

## BAB I. PENDAHULUAN UMUM

### 1.1.Latar Belakang

Tanaman aren (*Arenga pinnata* (Wurmb) Merr) adalah salah satu tanaman palma yang banyak ditemukan di daerah tropis. Aren tersebar di Asia selatan tropis hingga Asia Tenggara; India, Bangladesh, Malaysia, Indonesia, dan Filipina (Lim, 2012). Aren biasanya tumbuh di dekat populasi manusia, hutan sekunder hingga tepi hutan hujan utama dari dataran rendah hingga ketinggian sekitar 1.400 meter (Mogea et al., 1991). Di Indonesia, luas areal tanaman aren di Indonesia mencapai 63.244 Ha dengan jumlah produksi 106.486 Ton. Semua usaha tanaman aren berbasis perkebunan rakyat yang belum melibatkan industry besar. Pulau Jawa, Sulawesi dan Sumatera adalah 3 pulau dengan kontribusi luas areal tanaman aren tertinggi yaitu sebesar 22.110 ha, 17.321 ha dan 16.797 ha. Sulawesi Selatan memimpin produksi tertinggi diantara propinsi lain di Sulawesi dengan jumlah produksi mencapai 4.947 Ton (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2022). Di antara 3000 spesies tanaman palem tropis dan subtropis, aren dianggap sebagai salah satu spesies tanaman multiguna yang paling menguntungkan secara ekonomis. Selain menghasilkan gula, pohon ini juga menyediakan banyak produk dan manfaat bagi penggunaannya. Kemampuan beradaptasinya yang ekstrim menjadikan aren salah satu tanaman budidaya paling awal, dan kemungkinan merupakan sumber tanaman gula sebelum tebu ditanam untuk tujuan pemanis (Mogea et al., 1991). Nira adalah produk utama aren yang diolah menjadi minuman, gula aren, cuka, wine atau bioethanol (Dewi et al., 2018; Gunawan et al., 2020a; Harahap et al., 2020; Rindengan et al., 2006; Victor & Orsat, 2018).

Nira didapat dari proses penyadapan tangkai bunga aren. Proses penyadapan dilakukan dengan membersihkan tangkai perbungaan jantan dari cabangnya segera setelah bunga hampir terbuka. Batang yang sudah bersih kemudian ditumbuk dengan palu kayu atau alu kayu beberapa menit setiap hari selama kurang lebih dua atau tiga minggu dengan jarak sekitar 45-60 cm dari pangkal batang, hingga batang menjadi bengkak. Batang yang bengkak kemudian dipotong, dan cairan nira akan mengalir ke tempat penampungan nira. Tempat penampungan nira berupa pipa bambu, paralon atau tabung aluminium (Gunawan et al., 2020).

Nira aren segar dicirikan dengan rasa manis, berbau harum khas nira dan tidak berwarna (Nurlela, 2002), pH diatas 6 dan kadar gula total 10-20% (Rindengan et al., 2006; Victor, 2015). Rasa manis nira karena kandungan gula yang tinggi (93 g/100 g bahan kering) seperti sukrosa, glukosa, fruktosa, dan maltose (Lasekan, 2014). Nira didapatkan dari proses penyadapan batang bunga aren. Waktu penyadapan biasanya dilakukan dua kali dalam sehari, yaitu saat pagi hari dan sore hari. Wadah penampung nira dipasang pada sore hari dan dipanen saat pagi hari. Wadah diganti pada pagi hari dan dipanen saat sore hari (Maghfirah et al., 2019). Lama penyadapan yang mencapai 8-12 jam membuat nira aren rentan terhadap kerusakan karena mikroorganisme. Untuk mencegah hal tersebut, penyadap nira memasukkan beberapa bahan alami seperti daun manggis hutan, kulit manggis, batang kayu nangka, sabut kelapa atau akar kayu bayur

untuk mencegah kerusakan nira, (Mentari et al., 2017b; Quddus & Rostwentiwaivi, 2018; Rindengan et al., 2006). Nira segar dengan kualitas baik terasa manis dengan warna bening hingga sedikit keruh hingga kemerahan sesuai jenis pengawet alami yang digunakan. Nira jenis tersebut dapat diolah menjadi minuman, gula, wine, cuka, alkohol atau bioetanol (Astuti et al., 2018; Harahap et al., 2020; Redjeki et al., 2022). Perubahan kualitas nira ditandai dengan perubahan pH dan berkurangnya kandungan gula. Jika nira aren berubah kualitasnya menjadi lebih asam dan pahit, menandakan kandungan gula sudah berkurang dan nira hanya bisa diolah menjadi wine, vinegar atau bioethanol.

Secara tradisional, pengolahan nira aren menjadi minuman ataupun gula cetak menggunakan sistem pemanasan terbuka. Nira dipanaskan dalam pan terbuka hingga mendidih untuk minuman, atau dilanjutkan pemanasan hingga kandungan air berkurang dan larutan mencapai titik kristalisasi untuk pengolahan gula cetak. Lama waktu proses pemasakan mencapai 4 – 5 jam tergantung volume nira, bentuk tungku dan besarnya api. Proses ini, selain membutuhkan jumlah bahan bakar yang tinggi, menghasilkan ketidak stabilan mutu produk, juga berpotensi merusak kandungan nutrisi dalam produk akhir.

Perlakuan panas pada bahan makanan juga dapat menyebabkan berkurangnya kandungan gizi maupun komponen fitokimia makanan (Fang et al., 2022; Toydemir et al., 2022). Pemanasan bahan makanan dengan perebusan mengurangi kandungan Vitamin C mencapai 91% (Lee et al., 2018; Vieira et al., 2021) berkurangnya kandungan flavonoid, antosianin, karotenoid dan total kandungan fenolik pada produk (Czarnowska-Kujawska et al., 2022; Kurniati et al., 2019; S. Sharma et al., 2022; Tierno et al., 2015). Teknologi pemanasan terbaru telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pemanasan, dan mengurangi penurunan kualitas makanan. Pemanasan dengan microwave, penggunaan frekuensi radio dan pemanasan ohmic telah direkomendasikan sebagai teknologi pemanasan terbaru untuk menghasilkan makanan yang lebih sehat (Y. Liu et al., 2011; Pereira et al., 2008; Wang et al., 2012). Pemanasan ohmic dilaporkan menghasilkan produk yang seragam, waktu pemanasan lebih pendek, konsumsi energi rendah, dan peningkatan kualitas produk dan keamanan pangan. Secara komparatif, pemanasan ohmik menggunakan lebih sedikit energi dan berlangsung lebih cepat dibanding pemanasan konvensional. Pemanasan ohmik ditemukan menggunakan energi 4,6–5,3 kali lebih sedikit daripada pemanasan konvensional (Alkanan et al., 2021; Deeth & Datta, 2011; Wongsa-Ngasri & Sastry, 2016). Secara umum, riset ohmic heating (OH) untuk pengolahan pangan menunjukkan tren pertumbuhan kuat dalam dua dekade terakhir (2003–2023) dengan akselerasi terutama pada lima tahun terakhir, menandakan topik ini makin mapan dan diminati (Maspeke et al., 2024).

Beberapa penelitian aplikasi ohmic pada beberapa proses pengolahan pangan telah dilaporkan sebelumnya. Pada proses ekstraksi inti nenas, ditemukan bahwa total kandungan fenolik dan aktifitas antioksidan dengan ekstraksi ohmic, secara signifikan lebih tinggi dibandingkan sistem ekstraksi konvensional (Gavahian & Chu, 2022). Aplikasi OH pada pasteurisasi minuman whey rasa raspberry dengan kondisi ohmic 10, 100 Hz pada 25 V dan 45, 60 V pada 60 Hz menunjukkan aktivitas antioksidan tertinggi dibandingkan pemanasan tradisional (Ferreira et al., 2019). Kehilangan nutrisi pada proses blanching sayuran artichoke lebih tinggi pada blanching konvensional dibandingkan blanching dengan pemanasan ohmic (Guida et al., 2013). Jus wortel yang

diolah dengan OH memiliki kapasitas antioksidan total dan penerimaan sensoris yang lebih tinggi dibanding pemanasan konvensional (Rodríguez et al., 2021). Pada jus semangka, total perubahan warna selama perlakuan OH ditemukan lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan pemanasan air panas dengan waterbath. PPO pada jus semangka juga lebih diinaktivasi dengan perlakuan OH daripada waterbath (Makroo et al., 2017). Ohmic heating juga menghasilkan furan, komponen karsinogenik yang terbentuk selama pemanasan, lebih rendah dibanding pemanasan konvensional (Hradecky et al., 2017).

Meskipun berbagai hasil tersebut menunjukkan bahwa pemanasan ohmic berpotensi meningkatkan efisiensi proses dan mempertahankan mutu produk pangan, hingga saat ini belum ditemukan laporan yang secara spesifik mengkaji aplikasinya pada pasteurisasi nira aren segar. Selain itu, tahapan yang diperlukan sebelum implementasi industri mencakup serangkaian kajian berlapis, mulai dari penetapan kondisi proses yang aman dan masih dapat mempertahankan kualitas, evaluasi stabilitas jangka pendek, hingga analisis kelayakan proses dan ekonomi pada skala industri. Dalam konteks tersebut, penelitian ini dibatasi sampai pada tahap awal, yaitu evaluasi kelayakan pemanasan ohmic sebagai metode pasteurisasi nira aren pada skala laboratorium, melalui pengamatan sistem proses dan perubahan sifat fisikokimia nira aren sebelum dan sesudah pemanasan ohmic. Penelitian ini belum mencakup perancangan proses industri, analisis ekonomi, maupun kajian masa simpan jangka panjang, tetapi dimaksudkan sebagai studi awal yang menyediakan dasar ilmiah bagi penelitian lanjutan.

#### **1.1.1. Panen, pasca panen dan pengolahan nira aren**

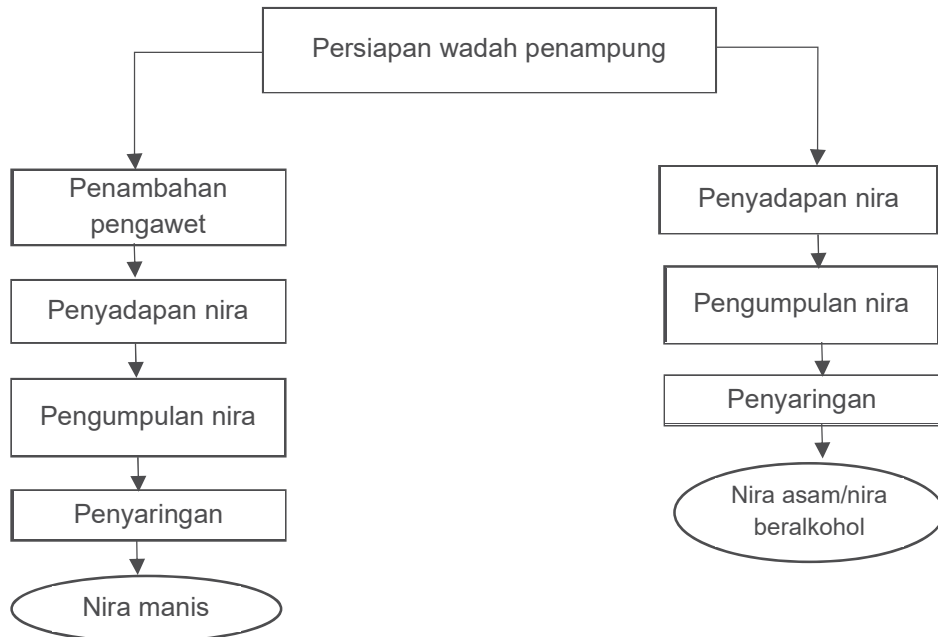
Nira aren didapatkan dari penyadapan tangkai bunga aren. Proses penyadapan dilakukan dengan membersihkan tangkai perbungaan jantan dari cabangnya segera setelah bunga hampir terbuka. Batang yang sudah bersih kemudian dipukul dengan palu kayu atau alu kayu beberapa menit setiap hari selama kurang lebih dua atau tiga minggu dengan jarak sekitar 45-60 cm dari pangkal batang, hingga batang menjadi bengkak. Batang yang bengkak kemudian dipotong, dan cairan nira akan mengalir ke tempat penampungan nira. Tempat penampungan nira berupa pipa bambu, paralon atau tabung aluminium (Gunawan et al., 2020). Waktu penyadapan nira aren biasanya dilakukan dua kali dalam sehari, yaitu saat pagi hari sore hari. Wadah penampung nira dipasang pada sore hari dan dikeluarkan saat pagi hari, wadah kemudian diganti dan dikeluarkan saat sore hari (Maghfirah et al., 2019). Lama penyadapan yang mencapai 8-12 jam membuat nira aren rentan terhadap kerusakan (Suroyya, 2016). Secara alami, nira mengandung khamir *Saccharomyces* sp, bakteri *Acetobacter* sp (Leasa & Matdoan, 2015; Lubis et al., 2013a) *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei* dan *Lactobacillus paracasei* (Sulistiani et al., 2020) yang bekerjasama merusak nira dengan mengubah gula menjadi alkohol kemudian menjadi asam asetat (Suroyya, 2016).

Penurunan mutu nira yang terjadi selama proses penyadapan dan penyimpanan ditandai dengan turunnya nilai pH. Untuk mencegah fermentasi terjadi secara cepat, masyarakat tradisional biasanya memanfaatkan bahan pengawet alami seperti larutan dari kayu nangka dan kapur, atau menggunakan ekstrak akar kuning (*Arcangelisia flava*)(Heryani & Nugroho, 2015a). Masing masing daerah di Indonesia memiliki kearifan lokal sendiri berkaitan dengan bahan yang digunakan sebagai pengawet alami. Di

daerah Sulawesi Utara, sabut kelapa adalah bahan yang umum digunakan sebagai pengawet nira. Di Gorontalo, selain sabut kelapa, petani juga menggunakan akar kayu bayur (*P. celebicum*) yang didapatkan dari hutan Taman Nasional Nani Wartabone (Repi, 2022). Akar kayu bayur dan daun manggis hutan digunakan di daerah Sulawesi Selatan (Fitriyani et al., 2014; Mentari, Djangi, & S. Sudding, 2017). Daerah Bangka menggunakan batang kayu cempedak (*Artocarpus champeden*) dan akar ube ube (*Derris elegans*) (Suganda et al., 2018), Beberapa wilayah sentra produksi gula aren di Bengkulu menggunakan Buah safat, Biji Jarak dan campuran Biji Kemiri dan Minyak kelapa (Marsigit, 2005), dan di Deli Serdang menggunakan akar kawao (Aditiano, Ginting, & Lubis, 2017). Efek dari masing masing bahan berbeda sesuai jenis dan dosis yang digunakan. Penambahan 2% ekstrak akar kuning (*Arcangelisia flava*) pada nira aren mampu menahan pH nira pada kisaran 5.8 – 6.5 selama proses penyimpanan dan penyadapan hingga 8 jam pada suhu ruang (Heryani & Nugroho, 2015a). Penambahan larutan kayu angka 12% pada nira sawit (*Elaeisis uineensis*) mampu menjaga pH nira hingga 6 meski disimpan selama 3 hari (72 jam) pada suhu ruang (Elvina et al., 2020). Sementara penambahan kulit manggis 30 g/2 L dapat mempertahankan kadar gula dan pH nira selama 48 jam penyimpanan pada suhu ruang (Lantemona et al., 2023).

Penanganan pasca panen nira mempengaruhi jenis produk olahan yang akan dihasilkan. Berdasarkan karakteristik nira dan cara pemanenannya, produk nira dibagi menjadi dua kelompok, yaitu nira yang tidak difermentasi atau disebut nira manis, dan nira yang difermentasi, yang menghasilkan nira asam atau nira dengan kandungan alkohol tinggi. Diagram pemanenan nira gula aren disajikan pada Gambar 1.1. Nira asam diperoleh dari proses pemanenan tanpa bahan pengawet atau membiarkan terjadinya proses fermentasi spontan yang diolah menjadi minuman beralkohol, cuka, atau bioetanol. Sedangkan nira manis segar atau nira yang belum difermentasi diolah menjadi minuman, sirup gula, gula cetak, dan gula semut. Nira segar manis juga dapat diolah menjadi nata de pinnata, toddy, cuka, atau bioetanol dengan cara menfermentasi nira segar manis setelah dipanen (Maspeke et al., 2025).

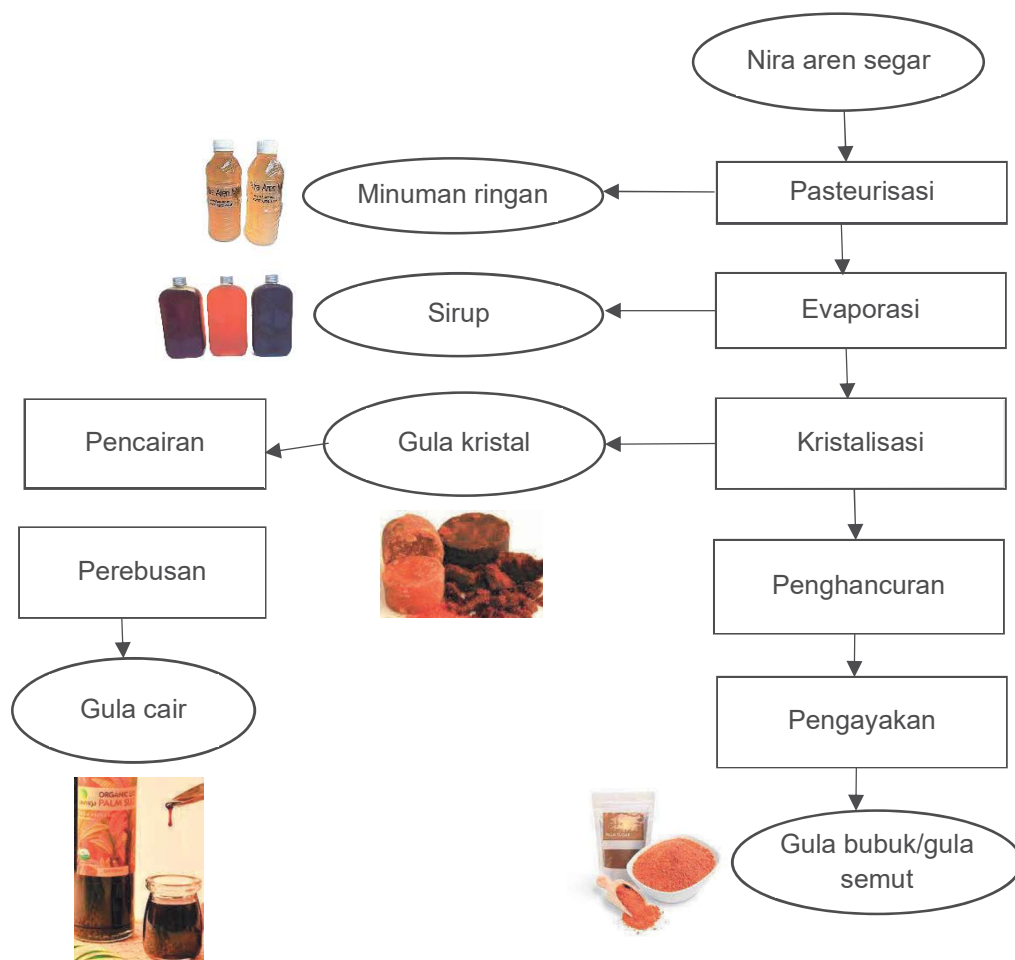
Secara tradisional, pengolahan nira aren dilakukan dengan pemanasan pan terbuka dengan sumber panas api dari kayu bakar. Lamanya tingkat pemanasan mempengaruhi produk akhir. Nira aren yang dipasteurisasi pada suhu 70-80 °C selama 15 menit menghasilkan minuman nira aren. Pemanasan lebih lama dengan suhu 100 °C menghasilkan sirup nira aren dengan total padatan terlarut mencapai 80°Brix (Barlina et al., 2020). Jika pemanasan dilanjutkan hingga mencapai suhu 160-180 °C menghasilkan gula aren cair dengan warna yang lebih pekat (Hilda, 2014) pada pemanasan dengan tingkat kekentalan selanjutnya hingga mencapai suhu kristalisasi, gula akan mengeras sehingga dapat di cetak menjadi gula aren cetak atau dihaluskan menjadi gula aren semut. Gambar 1.2 menyajikan proses pengolahan nira aren menjadi produk minuman hingga gula kristal.



Gambar 1.1 Proses pemanenan nira aren

Minuman Nira aren segar manis adalah minuman tradisional di beberapa daerah di Indonesia. Di Jawa Tengah dan Jawa Timur, nira aren manis dikenal dengan nama Legen, Jawa Barat; lahang, Bali; Tuak manis, Sulawesi Selatan; Ballo manis (Sulawesi Selatan) dan Sulawesi Utara; Sagner manis. Pada umumnya nira manis diminum dalam kondisi segar tanpa perlakuan apapun. Tetapi nira aren cepat rusak menjadi asam dan merusak rasa minuman. Proses pasteurisasi telah diuji coba pada nira aren dengan memanaskan nira pada suhu 121 °C. Dengan proses pasteurisasi, umur simpan nira aren mencapai 4 hari pada suhu dingin 10°C (Jaya et al., 2016).

Pengolahan nira aren menjadi sirup nira aren dilakukan dengan proses evaporasi wajan terbuka sederhana sehingga gula mengental. Warna sirup nira aren yang dihasilkan dipengaruhi jenis pengawet yang digunakan saat proses penyadapan nira dan lama waktu penguapan. Untuk mendapatkan gula aren cetak, proses evaporasi di lanjutkan hingga gula mencapai titik kristalisasi. Selama proses pemanasan beberapa faktor dapat mempengaruhi kualitas gula yang dihasilkan. Penggunaan api besar dapat dilakukan sebelum gula mengental. Jika penggunaan api besar terus dilakukan hingga gula mengkristal akan menyebabkan overkaramelisasi yang berakibat pada warna gula yang sangat pekat dan berasa pahit. Proses pemanasan secara tradisional mengakibatkan tidak seragamnya mutu gula aren yang dihasilkan di tingkat petani.



Gambar 1.2. Proses pengolahan produk nira aren segar

Selain kesulitan dalam pengontrolan kualitas gula, pemanasan suhu tinggi menyebabkan terjadinya kehilangan nutrisi selama proses pengolahan. Perlakuan panas pada bahan makanan dapat menyebabkan berkurangnya kandungan gizi maupun komponen fitokimia makanan (Fang et al., 2022; Toydemir et al., 2022). Pemanasan bahan makanan dengan perebusan mengurangi kandungan Vitamin C mencapai 91% (Lee et al., 2018; Vieira et al., 2021) berkurangnya kandungan flavonoid, antosianin, karotenoid dan total kandungan fenolik pada produk (Czarnowska-Kujawska et al., 2022; Kurniati et al., 2019; S. Sharma et al., 2022; Tierno et al., 2015).

### 1.1.2. Pengawetan nira aren

Nira aren merupakan bahan yang sangat mudah rusak akibat aktivitas mikroorganisme alami seperti *Saccharomyces sp.*, *Acetobacter sp.*, serta bakteri asam laktat (*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, *L. paracasei*), yang dengan cepat memfermentasi gula menjadi etanol dan asam asetat sehingga nira menjadi asam hanya dalam 2–3 jam

pasca penyadapan (Leasa & Matdoan, n.d.; Lubis et al., 2013b; Sulistiani et al., 2020b; Suroyya, 2016a). Untuk menekan kerusakan ini, masyarakat di berbagai daerah di Indonesia telah memanfaatkan berbagai bahan alami sebagai pengawet nira sesuai kearifan lokal. Beberapa contoh di antaranya adalah sabut kelapa di Sulawesi Utara (Barlina et al., 2006), ekstrak akar kuning (*Arcangelisia flava*) di Jawa (Heryani & Nugroho, 2015b), larutan kayu nangka (Elvina et al., 2020), daun manggis hutan (*Garcinia hombroniana*) dan akar kayu bayur di Sulawesi Selatan (Fitriyani et al., 2014; Mentari et al., 2017a), akar kawao di Sumatera (Aditiano, Ginting, Masniari Lubis, et al., 2017), serta kulit manggis (Lantemona et al., 2023). Efektivitas bahan-bahan tersebut bervariasi, misalnya akar kuning mampu menahan pH nira pada kisaran 5,8–6,5 hingga 8 jam, larutan kayu nangka menjaga pH nira sawit hingga 3 hari, sementara kulit manggis dapat mempertahankan kadar gula dan pH nira selama 48 jam penyimpanan.

Di antara berbagai pengawet alami tersebut, akar kayu bayur (*P. celebicum*.) dan rimpang kunyit (*C. longa*) menjadi perhatian khusus. Kayu bayur digunakan secara tradisional di Gorontalo dan Sulawesi Selatan untuk menahan laju keasaman nira, ditandai dengan perubahan warna kemerahan yang diduga terkait kandungan antosianin, meski belum ada data ilmiah yang mengkonfirmasi efektivitasnya (Fitriyani et al., 2014; Mentari et al., 2017). Sementara itu, kunyit dikenal luas sebagai rempah dengan kandungan kurkuminoid (kurkumin, demetoksikurkumin, bisdemetoksikurkumin) serta senyawa volatil ( $\alpha$ -turmeron, ar-turmeron, curlon) yang memiliki sifat antibakteri terhadap berbagai mikroba pangan (A. Gupta et al., 2015a; Hussain et al., 2022a; Kebede et al., 2021a; Mody et al., 2020a). Dibandingkan bahan lain, kunyit lebih mudah diperoleh, murah, dan potensial digunakan dalam skala lebih luas. Meskipun penggunaannya telah lama dipraktikkan, kajian ilmiah mengenai efektivitas kayu bayur dan kunyit dalam mempertahankan kualitas fisikokimia serta bioaktif nira aren masih terbatas dan perlu diteliti lebih lanjut.

### **1.1.3. Prinsip dan aplikasi pemanasan ohmik**

Ohmic heating (OH), juga dikenal sebagai Joule heating, electro-heating, atau electroconductive heating, adalah teknik pemrosesan termal terkini di mana arus listrik dikirim melalui makanan, yang menghasilkan panas karena hambatan listrik makanan (Silva et al., 2017; Varghese et al., 2014; Wongsa-Ngasri & Sastry, 2016). Tidak seperti pemanasan gelombang mikro dan frekuensi radio, kedalaman penetrasi pemanasan ohmik tidak terbatas. Namun, dalam pemanasan ohmik, elektroda harus bersentuhan dengan makanan yang mengandung cairan yang cukup untuk memodulasi energi. Berbeda dengan pemrosesan termal biasa, OH memanaskan seluruh bagian makanan secara seragam, menghasilkan produk berkualitas tinggi dengan kehilangan nutrisi minimal (Deeth & Datta, 2011; Wongsa-Ngasri & Sastry, 2016). OH membantu menjaga keberadaan nutrisi dengan mencegah terjadinya overheating pada sebagian area produk (Wongsa-Ngasri & Sastry, 2016). Teknik ini juga memungkinkan untuk memanaskan partikel makanan yang lebih besar (hingga 2,54 cm) dengan tingkat pemanasan yang seragam, yang tidak dapat dicapai dengan pemanasan konvensional (Deeth & Datta, 2011; Kaur & Singh, 2016a). Pemanasan ohmik menjanjikan dalam pengolahan makanan, termasuk memanaskan makanan cair yang mengandung partikel besar, seperti sup, semur, dan irisan buah dalam sirup dan saus, serta cairan yang peka

terhadap panas (Cho et al., 2016; Kaur & Singh, 2016a; Saxena et al., 2016; Soisungwan et al., 2020; Wongsan-Ngasri & Sastry, 2016).

Sistem pemanas ohmik terdiri dari ruang ohmik dengan dua elektroda di ujung-ujung ruang. Arus dialirkan dari satu elektroda ke elektroda lainnya oleh generator listrik. Termokopel yang dimasukkan ke dalam pusat sampel digunakan untuk mengukur suhu. Perekaman data terus menerus dilakukan untuk merekam variabel seperti arus, tegangan, dan suhu. Semua informasi yang didokumentasikan kemudian dapat diakses untuk dianalisis dan ditampilkan di komputer (Kamonpatana, 2018).

Prosedur OH dilakukan berdasarkan prinsip dasar hambatan listrik yang ditunjukkan oleh produk makanan. Mayoritas produk makanan mengandung jumlah air dan garam terlarut yang signifikan, yang memungkinkan terjadinya konduksi elektrolitik (Das et al., 2021). Ketika elektrolit ditempatkan dalam medan listrik, ion-ion yang ada di dalam elektrolit bergerak menuju elektroda dengan muatan yang berlawanan. Ion-ion yang bergerak di dalamnya juga bertabrakan satu sama lain, yang pada gilirannya menciptakan hambatan untuk pergerakan ion dan meningkatkan energi kinetiknya, efek Joule ini mengarah pada konversi energi listrik menjadi energi panas ketika listrik dialirkan melalui makanan olahan, sehingga meningkatkan suhu sehingga memanaskan produk (Singh dan Heldman 2014). Variasi dampak panas ohmik tergantung pada homogenitas produk makanan yang sedang dipelajari. Produk yang homogen, seperti minuman, kue kering, atau makanan dengan kandungan air yang tinggi, mendapat manfaat dari pemanasan volumetrik. Jenis pemanasan ini melibatkan konduksi, konveksi, dan radiasi, dan memungkinkan prosedur waktu singkat bersuhu tinggi. Hasilnya, produk akhir dipertahankan kualitasnya dengan lebih baik. Namun, untuk produk makanan yang komposisinya tidak seragam, tingkat pemanasan akan ditentukan oleh hubungan yang rumit antara konduktivitas partikel dan larutan di sekitarnya. Hal ini dapat menyebabkan tingkat pemanasan yang berbeda-beda di berbagai area yang terlokalisasi (Das et al., 2021).

Berdasarkan prinsip tersebut, kemampuan bahan pangan dalam menghantarkan listrik menjadi faktor yang sangat mempengaruhi keberhasilan pemanasan ohmic (Sarang et al., 2008). Dengan konduktivitas listrik yang cukup pada bahan pangan, arus listrik akan mengalir pada bahan dan menciptakan pergolakan molekul yang akan meningkatkan suhu secara simultan (Palaniappan & Sastry, 1991) (Icier et al., 2017). Pemanasan ohmic lebih direkomendasikan pada bahan cair dengan konduktivitas listrik besar dari 0.05 S/m (Patel & Singh, 2018) atau produk padatan yang mengandung garam (Markus Zell et al., 2009b). Pemanasan ohmic tidak merekomendasikan untuk bahan dengan lemak tinggi karena konduktivitas listrik yang lemah (Jafarpour & Hashemi, 2022). Desain pemanas ohmik yang efektif juga bergantung pada konduktivitas listrik makanan (Sarang et al., 2008). Tingkat pemanasan ohmik berbanding lurus dengan kuadrat dari kuat medan listrik dan daya hantar listrik. Beberapa penelitian telah dilakukan berkaitan dengan konduktivitas listrik bahan seperti pada produk buah cair seperti jus dan pure (Ariç Sürme & Sabancı, 2021; Castro et al., 2004; Hardinasinta et al., 2021; Icier et al., 2017; Icier & Ilicali, 2005c; Palaniappan & Sastry, 1991).

Selain konduktivitas listrik, kekuatan medan atau gradien tegangan, ukuran partikel bahan, konsentrasi bahan dan konsentrasi ionic dalam bahan dan jenis elektroda yang digunakan juga mempengaruhi keberhasilan pemanasan ohmic (Castro et al., 2004; Icier

et al., 2017; Filiz Icier & Ilicali, 2005a; Kaur & Singh, 2016a; Kim et al., 1996; Palaniappan & Sastry, 1991; Zareifard et al., 2003; Zell et al., 2011). Gradien tegangan, kekuatan medan atau intensitas medan listrik juga mempengaruhi pemanasan ohmik. Semakin besar intensitas medan listrik, semakin tinggi konduktivitas listrik dan semakin cepat laju pemanasan (N. Kaur & Singh, 2016a). (Castro et al., 2004) mengamati peningkatan konduktivitas listrik dengan kekuatan medan pada pulp stroberi dan isian stroberi. Proses pemanasan menyebabkan kerusakan membran dan akibatnya kandungan air bebas meningkat (Halden et al., 1990; Filiz Icier & Ilicali, 2005a; Sasson & Monselise, 1977). Aplikasi kekuatan medan menghasilkan peningkatan gerakan fluida melalui kapiler, yang berbanding lurus dengan konduktivitas listrik (Halden et al., 1990). (Icier & Ilicali, 2005a) juga menyebutkan bahwa pada gradien tegangan yang lebih tinggi, arus yang melewati sampel lebih tinggi dan ini meningkatkan laju pembentukan panas dalam produk. Kecenderungan serupa dilaporkan oleh Icier *et al* (Icier et al., 2006) saat mempelajari inaktivasi peroksida dan perubahan warna selama ohmik blanching bubur kacang. (An & King, 2007) dan Icier et al. (2008), juga melaporkan bahwa dengan peningkatan voltase, konduktivitas listrik dan laju pemanasan juga meningkat

Laju pemanasan ohmic juga dipengaruhi oleh frekuensi dan bentuk gelombang arus bolak balik, ukuran partikel dan konsentrasi ionik bahan (Icier & Ilicali, 2005a; H. J. Kim et al., 1996; Lima, 1999). Penurunan frekuensi arus bolak-balik secara signifikan meningkatkan jumlah minyak yang diekstraksi (Lakkakula et al., 2004) juga meningkatkan stabilisasi enzim dan proses lainnya (Lima & Sastry, 1999). (Zareifard et al., 2003), mengamati bahwa laju pemanasan menurun dengan bertambahnya ukuran partikel wortel. Mereka mengamati bahwa waktu pemanasan untuk mencapai kenaikan suhu yang sama meningkat dengan ukuran partikel. yang menyimpulkan bahwa konduktivitas listrik menurun dengan meningkatnya ukuran partikel. Sastry menemukan bahwa konsentrasi partikel merupakan faktor penentu dalam menentukan laju pemanasan dari dua fase (Sastry, 1992). Castro et al. (2003), mengamati penurunan konduktivitas listrik pulp strawberry saat konsentrasi strawberry dalam pulp meningkat. Pulp dengan nilai pH awal 4,0, nilai Brix 14,5° dan 2,5% (w/w kandungan pati) memiliki nilai konduktivitas listrik yang lebih besar daripada pulp dengan nilai pH 4,0, nilai Brix 26,5° dan tanpa pati. Peningkatan konduktivitas listrik selama pemanasan biologis terjadi karena peningkatan mobilitas ionic. Hal ini menyebabkan perubahan struktural dalam jaringan seperti kerusakan protopektin dinding sel, pengeluaran gelembung gas non konduktif, pelunakan, dan penurunan viskositas fase air (Bean et al., 1960; Sasson & Monselise, 1977). Semakin besar konsentrasi ionik semakin cepat laju pemanasan. Icier dan Ilicali melaporkan bahwa bubur aprikot, yang lebih asam, dipanaskan lebih cepat daripada bubur buah persik (Icier & Ilicali, 2005a). Sarang mengevaluasi pengaruh konsentrasi ionik pada pemanasan ohmik buah dan daging dan melaporkan bahwa konsentrasi ionik yang lebih tinggi memiliki efek yang cukup besar pada perilaku pemanasan bahan olahan menggunakan teknik pemanasan ohmik (Sarang et al., 2008).

Meskipun banyak penelitian tentang aplikasi pemanasan ohmic pada produk pangan, namun belum ada penelitian aplikasi ohmic dalam pengolahan produk aren. Mengetahui karakteristik pemanasan ohmic terhadap pengolahan nira aren, bagaimana pengaruh suhu dan waktu pemanasan ohmic terhadap perubahan nira aren akan

memberikan informasi yang dapat digunakan oleh masyarakat dalam upaya diversifikasi produk olahan aren maupun untuk pengembangan industri.

#### **1.1.4. Kinetika Degradasi Senyawa Bioaktif**

Proses thermal seperti pasteurisasi, sterilisasi, blanching dan evaporasi telah digunakan dalam pengolahan makanan untuk mengendalikan bakteri, jamur dan mikroba lain, serta inaktivasi enzim yang tidak diinginkan. Dengan sasaran keamanan pangan dan stabilitas umur simpan, proses thermal dapat melibatkan waktu pemanasan yang lebih lama dengan suhu tinggi. Hal ini memicu reaksi kimia dan fisik yang menyebabkan berkurangnya kualitas makanan atau menjadi tidak layak konsumsi, misalnya perubahan warna, bau, rasa, berkurangnya kesegaran dan kehilangan nutrisi (Liaotrakoon et al., 2013; Song et al., 2003; Wen et al., 2010; Zabbia et al., 2012).

Pengamatan kinetika degradasi memberikan wawasan tentang mekanisme reaksi yang terjadi selama degradasi. Ini penting untuk memahami bagaimana reaksi berlangsung, langkah-langkah elementer, jalur reaksi, dan mekanisme kinetik yang memungkinkan peningkatan proses (Queiroz et al., 2021). Perubahan degradasi kinetik bahan selama pemanasan ohmic telah di laporkan sebelumnya. Mercali, (2013) melaporkan bahwa pada suhu 75-90°C, degradasi antosianin sesuai dengan model reaksi orde pertama, dengan konstanta laju berkisar antara 5,9 hingga 19,9 x 10<sup>3</sup> menit<sup>-1</sup>. Pada semua suhu yang diuji, tidak ada perbedaan yang signifikan dalam konstanta laju proses pemanasan ohmik dan konvensional. Nilai-D bervariasi antara 116,7 dan 374,5 untuk pemanasan ohmik dan antara 134,9 hingga 390,4 untuk pemanasan konvensional. Nilai energi bebas inaktivasi berkisar antara 100,19 dan 101,35 kJ mol<sup>-1</sup>. Nilai entalpi aktivasi berkisar antara 71,79 hingga 71,94 kJ mol<sup>-1</sup> dan nilai entropi aktivasi berkisar antara -80,15 hingga -82,63 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Kedua proses pemanasan menunjukkan energi aktivasi 74,8 kJ mol<sup>-1</sup> dan parameter termodinamika yang serupa, menunjukkan mekanisme degradasi yang serupa (Mercali et al., 2013). Hardinasinta (2022) melaporkan bahwa, pada buah bignay, aplikasi suhu 70, 90, dan 110 °C, dengan lama waktu pemanasan 0, 15, 30, dan 45 menit, total fenol tidak menunjukkan perubahan yang signifikan, namun antosianin dan flavonoid terdegradasi secara signifikan dan mengikuti kinetika orde pertama (Hardinasinta et al., 2022). Mengetahui model degradasi senyawa fitokimia pada nira aren akan membantu dalam perancangan maupun optimasi proses pengolahan nira aren.

#### **1.2. Rumusan masalah**

Penelitian ini di rancang untuk menjawab pertanyaan berikut :

1. Bagaimana pengaruh penggunaan pengawet alami (akar kayu bayur dan rimpang kunyit) terhadap perubahan fisikokimia dan senyawa bioaktif nira aren setelah penyadapan?
2. Bagaimana pengaruh jenis pengawet dan umur simpan nira terhadap karakteristik pemanasan ohmic selama proses pasteurisasi nira aren?
3. Bagaimana pengaruh jenis pengawet, suhu dan waktu pasteurisasi ohmic terhadap degradasi senyawa bioaktif nira aren?.

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi pengaruh penggunaan pengawet alami, kayu bayur dan rimpang kunyit terhadap perubahan fisikokimia dan senyawa bioaktif nira pasca penyadapan.
2. Mengevaluasi pengaruh jenis pengawet nira, lama penyimpanan nira dan gradien tegangan terhadap karakteristik pasteurisasi ohmic nira aren
3. Mengevaluasi pengaruh jenis pengawet, suhu dan waktu pasteurisasi ohmic terhadap degradasi senyawa bioaktif pada nira aren.

### **1.4. Kegunaan Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat:

1. Menambah data ilmiah terkait penawetan alami dan pengolahan nira aren dengan teknologi ohmic
2. Menjadi rujukan bagi industri untuk mengembangkan produk nira aren dengan mutu dan nilai tambah yang lebih baik.
3. Memberikan edukasi kepada masyarakat terkait penggunaan pengawet alami dan diversifikasi produk nira aren.

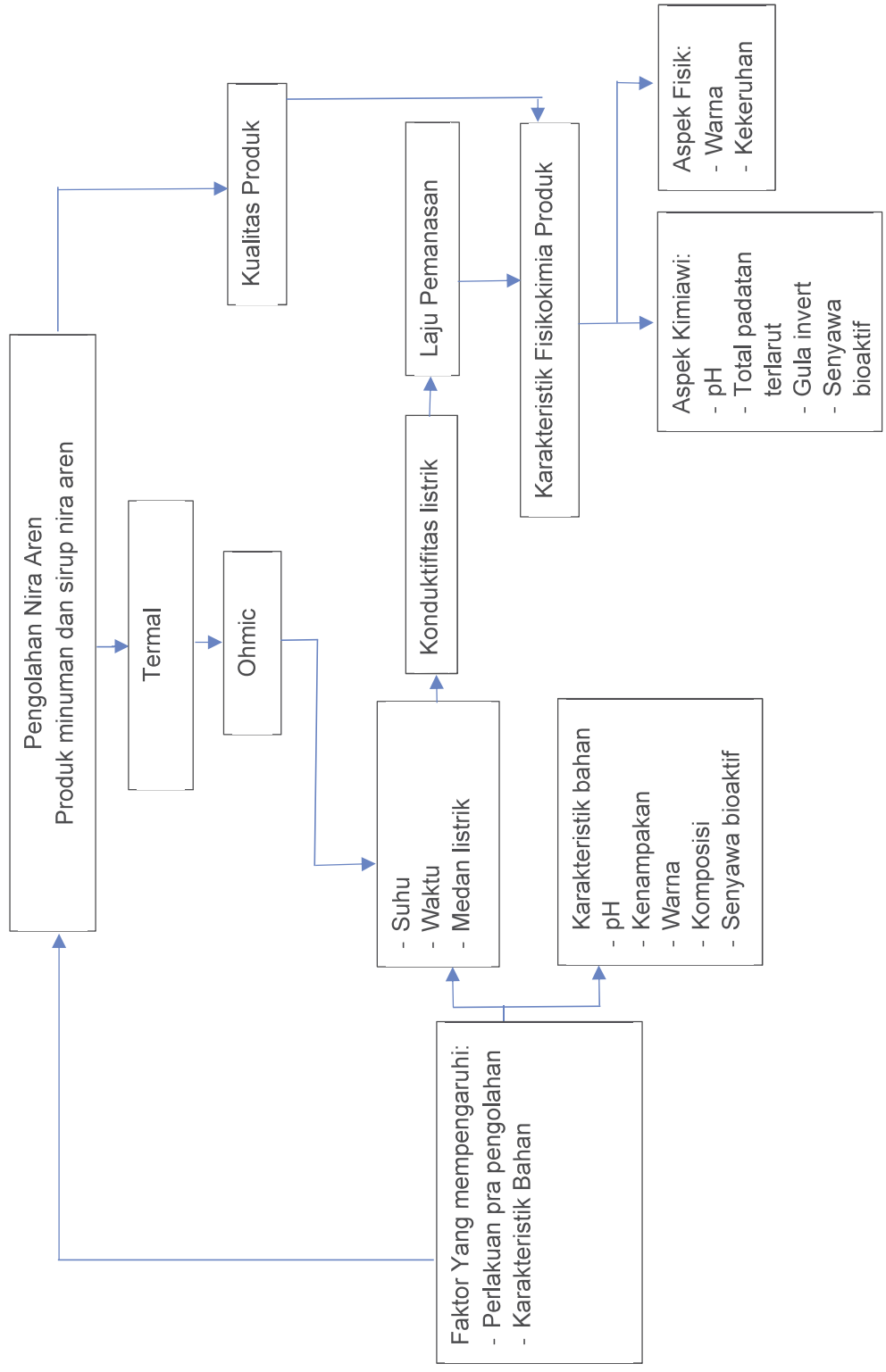
### **1.5. Ruang Lingkup Penelitian**

Penelitian ini terbagi atas tiga tahapan penelitian sebagai berikut:

1. Eksperimen 1; Karakteristik Fisikokimia Nira Aren dengan Pengawet Akar kayu Bayur dan Rimpang Kunyit. Pengaruh jenis pengawet terhadap perubahan pH, total padatan terlarut, warna, kekeruhan dan kandungan senyawa bioaktif mencakup Vitamin C, kandungan fenolik, antosianin dan kurkumin. Perubahan sifat fisik akan diukur setiap jam selama 8 jam pasca penyadapan, dan perubahan senyawa bioaktif di ukur setiap jam selama 4 jam.
2. Eksperimen 2; Karakteristik Pemanasan Ohmic Selama Proses Pasteurisasi Nira Aren. Pengaruh penggunaan pengawet akar kayu bayur, rimpang kunyit diukur dan nira tanpa penawet dengan lama penyimpanan dan gradien tegangan berbeda akan diukur terhadap karakteristik pemanasan ohmic. Parameter pengamatan meliputi perubahan konduktifitas listrik, evaluasi performa sistem pemanasan ohmic, perhitungan konsumsi energi sistem, pH, Total padatan terlarut, kekeruhan dan warna.
3. Eksperimen 3. Degradasi Kinetik Senyawa Bioaktif selama Proses Pasteurisasi Nira Aren. Perubahan kadar senyawa aktif jus nira mencakup perubahan total kandungan fenolik, total kandungan antosianin, total vitamin C dan kurkumin selama pemanasan ohmic. pengukuran dilakukan pada tiga perlakuan suhu dan tiga perlakuan waktu.

### **1.6. Kebaruan Penelitian**

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi teknologi pemanasan ohmic dan penggunaan pengawet akar kayu bayur dan rimpang kunyit dalam pengolahan nira aren, yang belum pernah diteliti sebelumnya.



Gambar 1.3. Kerangka Teori Penelitian

## BAB II. KARAKTERISTIK FISIKOKIMIA NIRA AREN DENGAN PENGAWET AKAR KAYU BAYUR DAN RIMPANG KUNYIT

**P N S Maspeke<sup>1</sup>, S Salengke<sup>2</sup>, J Muhidong<sup>2</sup>, A Dirpan<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Postgraduate School of Hasanuddin University, Makassar, 90245, Indonesia

<sup>2</sup> Department of Agricultural Engineering, Hasanuddin University, Makassar, 90245, Indonesia

<sup>3</sup> Department of Food Science and Technology, Hasanuddin University, Makassar, 90245, Indonesia

### Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi stabilitas fisikokimia dan kandungan bioaktif nira aren (*A. pinnata* Merr.) yang diawetkan menggunakan akar kayu bayur (*Pterospermum celebicum*) dan rimpang kunyit (*C. longa*). Rancangan faktorial meliputi dua pengawet (bayur, kunyit), dengan tiga konsentrasi (5, 10, 15 g/L), dan kontrol tanpa pengawet, serta penyimpanan 0–8 jam untuk parameter fisik (pH, kekeruhan, total padatan terlarut/TPT, gula invert, dan warna CIE Lab\*), dan 0–4 jam untuk parameter bioaktif (vitamin C, fenolik total, antosianin, kurkumin, dan kapasitas antioksidan/DPPH-IC<sub>50</sub>). Analisis dilakukan dengan Linear Mixed Method ( $\alpha=0,05$ ), post hoc dengan koreksi bonferroni, uji korelasi Pearson, dan Principle Component Analysis (PCA). Hasil menunjukkan bahwa jenis pengawet, konsentrasi, dan waktu berpengaruh nyata terhadap sebagian besar parameter fisik ( $p<0,001$ ), dengan beberapa interaksi signifikan, khususnya pada pH, kekeruhan, gula invert, dan atribut warna. pH nira segar mendekati netral dan menurun selama penyimpanan; bayur 10 g/L paling efektif memperlambat penurunan pH. Kekeruhan meningkat seiring waktu, namun nira dengan kunyit tetap lebih jernih (titik awal ~22,92 NTU) dibanding bayur (~126,31 NTU). TPT menurun, gula invert meningkat lebih lambat pada nira dengan pengawet. Pada warna, L\* menurun, a\* bergeser ke merah, dan b\* lebih tinggi pada kunyit. Komponen fenolik total meningkat dari ~28 menjadi ~41 mg GAE/100 mL (0–4 jam), sedangkan vitamin C menurun dari ~8 menjadi ~5 mg/100 mL. Kurkumin hanya terdeteksi pada kunyit dan meningkat seiring konsentrasi hingga ~0,1892 (15 g/L), sedangkan antosianin hanya pada bayur (~2,8 pada 15 g/L). kapasitas antioksidan meningkat dengan nilai IC<sub>50</sub> ~27,63 (0 g/L) hingga ~15,05 (15 g/L). pH berkorelasi negatif dengan kekeruhan dan gula invert, serta positif dengan TPT; PCA mengungkap dua sumbu dominan: kesegaran fisikokimia (pH–TPT–L\* vs kekeruhan–gula invert–a\*) dan kestabilan bioaktif (fenolik/vitamin C/IC<sub>50</sub>). Secara keseluruhan, kisaran 10 g/L telah mampu memperlambat perubahan fisikokimia nira aren, dengan mempengaruhi warna merah dan kekeruhan pada penambahan akar kayu bayur dan mempertahankan kejernihan dan stabilitas warna pada kunyit. Hasil ini direkomendasikan menjadi dasar pertimbangan pemilihan pengawet nira dalam penyiapan bahan baku untuk teknologi proses nira selanjutnya.

**Kata kunci:** *A. pinnata*, *C. longa*, *Pterospermum celebicum*, senyawa bioaktif, antioksidan.

## 2.1. Pendahuluan

Tanaman aren (*A. pinnata* Merr) merupakan salah satu tanaman penghasil gula yang tersebar luas di wilayah Asia Selatan dan Tenggara, termasuk seluruh Indonesia (Mogea et al., 1991). Salah satu produk utama tanaman aren adalah nira, yang digunakan sebagai bahan baku gula aren, minuman fermentasi, atau bioetanol (Dewi et al., 2018; Gunawan et al., 2020a; Rindengan et al., 2006; Victor & Orsat, 2018).. Nira diperoleh melalui proses penyadapan tangkai bunga, di mana tangkai bunga jantan umumnya memberikan hasil nira yang lebih baik dibandingkan tangkai betina (Gunawan et al., 2020).

Nira aren segar memiliki sifat fisikokimia yang khas, seperti warna bening, rasa manis, dan aroma khas nira (Lempang, 2012; Nurlela, 2002). Kandungan gula totalnya tinggi, mencapai 12,50–14,0% Brix (Rindengan et al., 2006), dengan komponen utama berupa sukrosa, glukosa, fruktosa, dan maltosa, serta kandungan protein dan mineral (Lasekan, 2014; Solang et al., 2020). Namun, nira sangat mudah mengalami kerusakan akibat aktivitas mikroorganisme seperti khamir (*Saccharomyces* sp.) dan bakteri asam asetat (*Acetobacter* sp., *Lactobacillus* sp.) yang secara alami terdapat pada perbungaan dan seludang bunga (Leasa & Matdoan, 2015; Lubis et al., 2013a; Sulistiani et al., 2020a). Mikroorganisme ini bekerjasama merusak nira dengan mengubah gula menjadi alkohol kemudian menjadi asam asetat (Suroyya, 2016b). Dengan kondisi tersebut, nira dapat mengalami kerusakan jika dibiarkan selama  $\pm 2,5$  jam, sehingga kerusakan tersebut harus dihambat dan ditangani secara baik (Lubis et al., 2013a).

Penggunaan pengawet berupa daun, batang atau akar tanaman secara tradisional telah dilakukan oleh penyadap nira. Masing masing daerah di Indonesia menggunakan bahan alami yang berbeda sesuai dengan kearifan lokal wilayah setempat. Di daerah Sulawesi Utara, sabut kelapa adalah bahan yang umum digunakan sebagai pengawet nira. Serat sabut kelapa bersifat antibakteri (Puspita et al., 2022) yang diduga berkaitan dengan keberadaan metabolit sekunder seperti flavonoid, terpenoid, tannin, polifenol (Sari et al., 2021). Ekstrak sabut kelapa mengandung alkaloid, flavonoid, polifenolat, tannin, antraquinon, mono dan sesquiterpene, triterpenoid dan steroid (Jauziyah et al., 2019) dan antosianin 8.34 mg/100 g, yang dihitung sebagai sianidin-3-glikosida (Anggriani et al., 2017). Penggunaan sabut kelapa segar sebanyak 50 g dapat mempertahankan mutu nira sampai 3 jam setelah sadap dengan kualitas nira baik dan keasamannya netral (pH 6,32) (Rindengan et al., 2006).

Selain sabut kelapa, beberapa wilayah sentra produksi gula aren di Bengkulu menggunakan buah safat, biji jarak dan campuran biji kemiri dan minyak kelapa (Marsigit, 2005). Di Deli Serdang menggunakan akar kawao (Aditiano et al., 2017). Daerah Bangka menggunakan batang kayu cempedak (*Artocarpus chameden*) dan akar ube ube (*Derris elegans*) (Suganda et al., 2018), Efek dari masing masing bahan berbeda sesuai jenis dan dosis yang digunakan. Penambahan 2% ekstrak akar kuning (*Arcangelisia flava*) pada nira aren mampu menahan pH nira pada kisaran 5.8 – 6.5 selama proses penyimpanan dan penyadapan hingga 8 jam pada suhu ruang (Heryani & Nugroho, 2015a). Penambahan larutan kayu angka 12% pada nira sawit (*Elaeisis uineensis*) mampu menjaga pH nira hingga 6 meski disimpan selama 3 hari (72 jam) pada suhu ruang (Elvina et al., 2020). Sementara penambahan kulit manggis 30 g/2 L dapat mempertahankan kadar gula dan pH nira selama 48 jam penyimpanan pada suhu ruang

(Lantemona et al., 2023). Penyadap nira aren di daerah Gorontalo dan Sulawesi Selatan juga menggunakan akar kayu bayur (*P. celebicum*) dan daun manggis hutan (*Garcinia hombroniana pierre*) (Fitriyani et al., 2014; Mentari, Djangi, & S. Sudding, 2017; Repi, 2022). Penggunaan daun manggis hutan 2 g/liter nira mampu memperlambat penurunan pH hingga 4 jam (Fitriyani et al., 2014). Penggunaan akar kayu bayur, meskipun telah dilakukan secara turun temurun tetapi belum ada laporan akademis tentang lama waktu penghambatan perubahan pH pada nira aren. Nira dengan penambahan akar kayu bayur menjadi berwarna merah yang diduga kuat berkaitan dengan kandungan senyawa seperti antosianin.

Kunyit sering disebut sebagai "*Golden Spice*" (Rempah Emas) atau "*Queen of Spices*" (Ratu Rempah) dan dianggap sebagai *panacea* (obat segala penyakit) dalam pengobatan tradisional karena spektrum khasiatnya yang sangat luas (Agarwal et al., 2018; Altunay et al., 2020; Pal et al., 2020). Kandungan bioaktif utama kunyit adalah kurkuminoid (sekitar 77%) (Agarwal et al., 2018; Anand et al., 2007), dengan manfaat yang di laporkan sebagai anti inflamasi (Rao & Sakariah, 2005), antioksidan kuat (Nanavati et al., 2022; Sahebkar et al., 2015), potensial sebagai antikanker (Palani et al., 2025; Rapalli et al., 2020), membantu kesehatan metabolik dan antidiabetes (S. C. Gupta et al., 2013; Mohajeri et al., 2025), cardiovascular protection dan *hepatoprotector* (Mandal et al., 2023a; Mohajeri et al., 2025), dan antimicrobial (Zorofchian Moghadamtousi et al., 2014). Beberapa mikroorganisme yang dilaporkan dapat dihambat pertumbuhannya oleh ekstrak kunyit adalah *Staphylococcus aureus* (Gupta et al., 2015) *Salmonella sp.*, *Listeria monocitogenes*, *Eschericia coli*, *Helicobacter pylori* and *Mycobacterium tuberculosis* (Hussain et al., 2022b; Mohajeri et al., 2025; Tyagi et al., 2015). Dibandingkan beberapa jenis bahan pengawet alami diatas, kunyit relatif lebih mudah dibudidayakan dan ditemukan dengan harga murah di Indonesia. Melihat potensi kandungan senyawa fitokimia, manfaat kesehatan dan sifat antibakteri kunyit, diduga rimpang kunyit dapat memberikan efek yang pengawetan nira yang sama seperti pengawet alami yang digunakan oleh penyadap nira, dan meningkatkan nilai fungsional nira aren.

Meski penggunaan pengawet alami telah banyak dipraktikkan, sepanjang pengetahuan penulis, belum ada penelitian komprehensif yang membahas perubahan profil fisikokimia dan kandungan senyawa bioaktif nira aren akibat penambahan akar kayu bayur dan rimpang kunyit. Sebagian besar studi sebelumnya hanya fokus pada aspek ketahanan fisik atau perubahan satu-dua parameter kimiawi saja, belum mencakup dinamika perubahan kedua aspek utama tersebut secara simultan. Selain itu, belum banyak data terkait hubungan antara parameter fisikokimia dan kandungan bioaktif selama periode penyimpanan nira dengan berbagai level pengawet alami.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis perubahan profil fisik dan kandungan senyawa bioaktif nira aren, tanpa menggunakan pengawet dan dengan menggunakan pengawet rimpang kunyit dan akar kayu bayur pada berbagai konsentrasi, serta menganalisis hubungan antarparameter utama nira aren setelah penyadapan, selama penyimpanan jangka pendek.

## 2.2. Bahan dan Metode Penelitian

### 2.2.1. Bahan

Nira Aren didapatkan dari Dusun Kappang Desa Labuaja Kecamatan Cenrana Kabupaten Maros Sulawesi Selatan. Penyiapan nira diawali dengan mempersiapkan wadah penampung untuk penyadapan nira. Wadah penampung nira disterilisasi dengan mencuci menggunakan air mendidih sebelum dan sesudah penyadapan. Serutan akar kayu bayur dan cacahan rimpang kunyit dimasukkan pada wadah berbeda, pada wadah lainnya tanpa penambahan pengawet sebagai control. Wadah penampung di biarkan selama 1 jam hingga nira mencapai 1 liter. Nira yang dipanen kemudian dimasukkan dalam wadah botol plastik 1 liter untuk kemudian dilakukan pengujian. Pengujian pH, kekeruhan, total padatan terlarut, gula invert dan warna diamati di lapangan, untuk sampel nira dengan pengujian kandungan senyawa bioaktif, nira segar disimpan dalam wadah berpendingin untuk kemudian di bawa ke laboratorium. Penyadapan dilakukan pada pohon yang sama selama waktu pengamatan.

### 2.2.2. Rancangan Percobaan

Percobaan bertujuan untuk mengetahui perubahan sifat fisikokimia dan kandungan senyawa bioaktif pada nira aren selama penyimpanan setelah penambahan pengawet alami. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan struktur perlakuan berupa kombinasi faktorial antara jenis pengawet dan konsentrasi pengawet, serta satu perlakuan kontrol tanpa pengawet. Faktor jenis pengawet terdiri atas rimpang kunyit (*Curcuma longa*) (A1) dan akar kayu bayur (*Pterospermum celebicum*) (A2). Faktor konsentrasi terdiri atas 3 level, yaitu 5 g/L (B1), 10 g/L (B2), dan 15 g/L (B3), serta satu perlakuan kontrol (K) berupa nira tanpa penambahan pengawet. Pemilihan kisaran konsentrasi didasarkan pada praktik penyadap, yaitu sekitar 10 g/L sebagai dosis rata-rata yang umum digunakan di lapangan, kemudian ditetapkan satu level di bawah (5 g/L) dan satu level di atasnya (15 g/L).

Nira yang telah diberi perlakuan kemudian disimpan selama 8 jam pada suhu ruang dengan titik pengamatan pada 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8 jam (T0–T8). Dengan demikian, terdapat 7 kombinasi perlakuan pada setiap titik waktu, yaitu K, A1B1, A1B2, A1B3, A2B1, A2B2, dan A2B3. Setiap kombinasi perlakuan dan titik waktu diulang sebanyak tiga kali sehingga menghasilkan 189 unit percobaan untuk analisis sifat fisikokimia (7 perlakuan × 9 titik waktu × 3 ulangan). Komponen bioaktif dianalisis sampai 4 jam penyimpanan (T0–T4) dengan struktur perlakuan dan jumlah ulangan yang sama.

Pengujian dilakukan terhadap perubahan fisik dan kimia nira. Perubahan fisik mencakup perubahan pH, kekeruhan, total padatan terlarut, gula invert, dan warna diamati setiap jam selama 8 jam. Perubahan kimia mencakup perubahan kandungan senyawa bioaktif diamati setiap jam sejak selesai penyadapan selama 4 jam. Parameter yang diamati adalah yaitu total kandungan Vitamin C, total phenolic, antosianin, kurkuminoid dan aktifitas antioksidan.

Tabel 2.1. Denah rancangan perlakuan nira aren pada 8 waktu penyimpanan untuk pengujian fisikokimia

Waktu	Kontrol tanpa pengawet (K)	Kunyit 5 g/L (A1B1)	Kunyit 10 g/L (A1B2)	Kunyit 15 g/L (A1B3)	Bayur 5 g/L (A2B1)	Bayur 10 g/L (A2B2)	Bayur 15 g/L (A2B3)
T0	K-T0-U1	A1B1-T0-U1	A1B2-T0-U1	A1B3-T0-U1	A2B1-T0-U1	A2B2-T0-U1	A2B3-T0-U1
T1	K-T1-U1	A1B1-T1-U1	A1B2-T1-U1	A1B3-T1-U1	A2B1-T1-U1	A2B2-T1-U1	A2B3-T1-U1
T2	K-T2-U1	A1B1-T2-U1	A1B2-T2-U1	A1B3-T2-U1	A2B1-T2-U1	A2B2-T2-U1	A2B3-T2-U1
T3	K-T3-U1	A1B1-T3-U1	A1B2-T3-U1	A1B3-T3-U1	A2B1-T3-U1	A2B2-T3-U1	A2B3-T3-U1
T4	K-T4-U1	A1B1-T4-U1	A1B2-T4-U1	A1B3-T4-U1	A2B1-T4-U1	A2B2-T4-U1	A2B3-T4-U1
T5	K-T5-U1	A1B1-T5-U1	A1B2-T5-U1	A1B3-T5-U1	A2B1-T5-U1	A2B2-T5-U1	A2B3-T5-U1
T6	K-T6-U1	A1B1-T6-U1	A1B2-T6-U1	A1B3-T6-U1	A2B1-T6-U1	A2B2-T6-U1	A2B3-T6-U1
T7	K-T7-U1	A1B1-T7-U1	A1B2-T7-U1	A1B3-T7-U1	A2B1-T7-U1	A2B2-T7-U1	A2B3-T7-U1
T8	K-T8-U1	A1B1-T8-U1	A1B2-T8-U1	A1B3-T8-U1	A2B1-T8-U1	A2B2-T8-U1	A2B3-T8-U1

Ket: ulangan dilakukan sebanyak 3 kali, denah rancangan hanya menampilkan 1 kali ulangan (U1)

Tabel 2.2. Denah rancangan perlakuan nira aren pada 4 waktu penyimpanan untuk pengujian fisikokimia

Waktu	Kontrol tanpa pengawet (K)	Kunyit 5 g/L (A1B1)	Kunyit 10 g/L (A1B2)	Kunyit 15 g/L (A1B3)	Bayur 5 g/L (A2B1)	Bayur 10 g/L (A2B2)	Bayur 15 g/L (A2B3)
T0	A1B1-T0-U1	A1B2-T0-U1	A1B3-T0-U1	A2B1-T0-U1	A2B2-T0-U1	A2B3-T0-U1	A1B1-T0-U1
T1	A1B1-T1-U1	A1B2-T1-U1	A1B3-T1-U1	A2B1-T1-U1	A2B2-T1-U1	A2B3-T1-U1	A1B1-T1-U1
T2	A1B1-T2-U1	A1B2-T2-U1	A1B3-T2-U1	A2B1-T2-U1	A2B2-T2-U1	A2B3-T2-U1	A1B1-T2-U1
T3	A1B1-T3-U1	A1B2-T3-U1	A1B3-T3-U1	A2B1-T3-U1	A2B2-T3-U1	A2B3-T3-U1	A1B1-T3-U1
T4	A1B1-T4-U1	A1B2-T4-U1	A1B3-T4-U1	A2B1-T4-U1	A2B2-T4-U1	A2B3-T4-U1	A1B1-T4-U1

Ket: ulangan dilakukan sebanyak 3 kali, denah rancangan hanya menampilkan 1 kali ulangan (U1)

## 2.2.3. Parameter Pengamatan

### 2.2.3.1. Parameter fisik

#### pH

pH diukur dengan menggunakan pH meter portable (Hanna HI 98108) dikalibrasi dengan larutan buffer pH 7,0 dan 4,0. Pengukur pH dicelupkan ke dalam nira aren dan kemudian dibiarkan sampai angkanya stabil. Nilai yang ditunjukkan pada layar monitor pH meter adalah nilai pH dari telur cair.

#### Kekeruhan

Kekeruhan nira diukur menggunakan turbidimeter Lutron TU-2016. Prinsip kerja turbidity meter memanfaatkan 'Sumber Cahaya' (*Light Source*), yang kemudian diubah menjadi cahaya monokromatik. Ketika cahaya monokromatik dilewatkan melalui larutan sampel yang berada dalam *testing bottle*, maka partikel tersuspensi dalam larutan sampel akan menyerap energi dari cahaya dimaksud. Selanjutnya, larutan sampel akan menghamburkan kembali cahaya dalam berbagai arah. Perangkat *photodetector* pada unit alat akan mendeteksi cahaya yang dihamburkan oleh partikel tersuspensi tadi dan ditransmisikan dalam bentuk sinyal elektronik. Sinyal elektronik akan dikonversi oleh alat menjadi bentuk numerik sebagai nilai kekeruhan atau turbiditas sampel.

### *Total Padatan Terlarut*

Total padatan terlarut (TPT) diukur menggunakan refraktometer Hanna HI 96801 dinyatakan dalam % Brix. Prinsip kerja refraktometer adalah berdasarkan pengukuran indeks bias larutan. Alat ini menggunakan sensor untuk mendeteksi perubahan sudut cahaya yang melewati larutan, dan mengkonversinya menjadi nilai TSS yang terukur.

### *Gula Invert*

Jumlah gula invert diukur dengan refraktometer hanna HI96804. Refraktometer ini mengukur indeks bias larutan untuk menentukan kadar gula invert dalam larutan air. Indeks bias sampel diubah menjadi unit konsentrasi dalam % massa (% b/b).

### *Warna*

Warna nira diukur menggunakan colorimeter (CS-10 Colorimeter, Hangzhou CHN Spec Technology, China). Parameter warna sampel ditentukan berdasarkan parameter CIE  $L^*$   $a^*$   $b^*$ , dimana  $L^*$  merepresentasikan lightness dengan rentang nilai antara 0-100 (sumbu hitam-putih),  $a^*$  merepresentasikan warna hijau-merah dengan rentang nilai antara -60 hingga +60 (sumbu hijau-merah), dan  $b^*$  mewakili warna biru-kuning dengan kisaran -60 hingga +60 (sumbu biru-kuning).

### **2.2.3.2. Senyawa Fitokomia**

Analisis kimia dilakukan untuk mengetahui total kandungan vitamin C, total kandungan antosianin, total kandungan curcumin, total kandungan fenolik dan aktivitas antioksidan pada nira aren di setiap perlakuan. Pengukuran dilakukan dengan tiga kali pengulangan.

#### *Penentuan Total Kandungan Vitamin C*

Pengukuran kandungan Vitamin C mengikuti metode spektrofotometri (Devolli et al., 2021). Analisis kadar vitamin C pada sampel jus buah komersial dilakukan menggunakan metode spektrofotometri dengan pereaksi kalium permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) sebagai pereaksi kromogenik. Prinsip metode ini adalah pengukuran penurunan absorbansi larutan  $\text{KMnO}_4$  berwarna ungu pada panjang gelombang 530 nm setelah bereaksi dengan asam askorbat dalam suasana asam, membentuk senyawa dehidroaskorbat yang tidak berwarna. Larutan standar asam askorbat dibuat dengan melarutkan 0,01 g asam askorbat dalam sedikit larutan asam oksalat 0,5%, kemudian diencerkan dengan akuades hingga volume 100 mL untuk memperoleh konsentrasi 100 mg/L. Larutan pereaksi  $\text{KMnO}_4$  100 mg/L disiapkan dengan melarutkan 0,01 g  $\text{KMnO}_4$  dalam larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  5 M, kemudian diencerkan hingga volume 100 mL dengan akuades. Kurva kalibrasi dibuat menggunakan dua rentang konsentrasi standar asam askorbat, yaitu 0,1–4 mg/L dan 10–100 mg/L. Setiap 10 mL larutan standar ditambahkan 1 mL larutan  $\text{KMnO}_4$ , didiamkan selama 5 menit, kemudian absorbansinya diukur pada panjang gelombang 530 nm terhadap blanko. Nilai absorbansi diplot terhadap konsentrasi untuk mendapatkan persamaan regresi linier yang digunakan dalam perhitungan. Sebanyak 10 mL sampel jus buah dimasukkan ke dalam tabung ukur, kemudian ditambahkan 1 mL larutan  $\text{KMnO}_4$  100 mg/L, dihomogenkan, dan didiamkan selama 5 menit. Absorbansi larutan diukur pada panjang gelombang 530 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Spectrophotometer model 722, Huanghua Faithful Instrument Co., Ltd). Konsentrasi vitamin C pada sampel ditentukan berdasarkan persamaan regresi kurva kalibrasi, kemudian dinyatakan dalam satuan mg vitamin C per 100 mL sampel.

### *Penentuan Total Kandungan Fenolik*

Pengukuran fenolik total dilakukan mengikuti Metode Folin Ciocalteu dijelaskan dalam (Tezcan et al., 2009) dengan beberapa modifikasi. Larutan stok dibuat dengan mengencerkan 0,1 mL nira aren dalam 10 mL pelarut metanol:air (6:4 v/v). Penentuan senyawa fenolik dilakukan sebagai berikut. Larutan stok sebanyak 0,5 mL dicampur dengan 1,5 mL reagen Folin Ciocalteu (7,5%) dan 1,2 mL Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (7,5%) dan ditambahkan air suling hingga mencapai volume total 5 mL. Campuran didiamkan selama 90 menit pada suhu ruang sebelum dilakukan pengukuran absorbansi pada panjang gelombang 760 nm menggunakan Spektrofotometer UV-Vis (Spectrophotometer model 722, Huanghua Faithful Instrument Co., Ltd). Hasilnya dinyatakan sebagai ekuivalen asam galat (mg GAE/100 mL nira) menggunakan kurva kalibrasi asam galat dari 2-10 ppm.

### *Pengukuran Kadar Total Monomerik Antosianin*

Total antosianin dianalisa menggunakan UV-Vis spektrofotometer (Spectrophotometer model 722, Huanghua Faithful Instrument Co., Ltd) dengan metode *pH differential* (Merciali et al., 2013). Metode ini mengukur perbedaan warna dua sampel yang diperoleh dengan mereaksikan sampel dengan larutan buffer pada dua tingkat pH yang berbeda. Sebanyak 50 µl sampel dipipet pada dua buah vial 5 ml. Kemudian pengenceran 100 kali dilakukan pada sampel dengan menambahkan larutan *buffer* kalium klorida (0,025 M) pada pH 1,0 ke salah satu vial dan larutan *buffer* natrium asetat (0,4 M) pada pH 4,5 ke vial lainnya. Preparasi larutan *buffer* dilakukan berdasarkan metode standar (AOAC, 2005). Selanjutnya sampel diinkubasi di dalam ruangan gelap selama 20 menit pada suhu ruang dan absorbansi masing-masing sampel diukur menggunakan panjang gelombang 520 dan 700 nm. Absorbansi total sampel dihitung menggunakan Persamaan 1:

$$A = (A_{520} - A_{700})_{pH1,0} - (A_{520} - A_{700})_{pH4,5} \dots \dots \dots (1)$$

dimana A<sub>520</sub> adalah absorbansi pada panjang gelombang 520 nm, dan A<sub>700</sub> adalah absorbansi pada panjang gelombang 700 nm. Kandungan antosianin total ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2 :

$$TA \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{A \times MW \times DF \times 10^3}{\epsilon \times l} \dots \dots \dots (2)$$

dimana A adalah total absorbansi, MW adalah berat jenis dari standar yang digunakan yaitu cyaniding-3-glucoside (445,2 g/mol), DF adalah faktor pengenceran, ε adalah kapasitas penyerapan molar (29600 L/mol.cm), dan l adalah panjang cuvette (1 cm).

### *Pengukuran Kadar Kurkumin*

Pengukuran kadar kurkumin dilakukan dengan metode spektrofotometri yang diukur pada panjang gelombang 420 nm (Thaikert & Paisooksantivatana, 2009), dengan modifikasi penyiapan sampel. Kurkumin standar (2,00 mg) ditimbang dengan akurat dan dipindahkan ke labu ukur 5 ml. Metanol ditambahkan dan disesuaikan hingga konsentrasi akhir 400 µg/ml. Dari larutan ini, dibuat konsentrasi 0,4, 0,8, 1,6, 2,0, 2,4, 3,2, dan 4,0 µg/ml disiapkan dan digunakan untuk pembuatan kurva kalibrasi. Sampel untuk pengukuran absorbansi disiapkan dengan melarutkan 0.25 ml sampel dalam 5 ml metanol. dengan total kurkumin dinyatakan dengan µg/mL.

### *Pengukuran Aktivitas Antioksidan*

Pengukuran aktivitas antioksidan ketiga nira aren dilakukan dengan menggunakan metode 2,2 *Diphenyl-1 picrylhydrazyl* (DPPH) Kemampuan inhibisi radikal DPPH ditentukan berdasarkan metode yang dijelaskan dalam Abbas (Abbas et al., 2014). Larutan radikal DPPH 0,25 mM (0,5 ml) ditambahkan ke dalam larutan sampel dalam etanol (1 ml) dengan konsentrasi yang berbeda (25-300 µg/ml) nira aren. Campuran homogenkan dan didiamkan selama 30 menit dalam keadaan gelap, dan absorbansi diukur pada 517 nm. Kapasitas untuk membersihkan radikal DPPH dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$(\%) = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100$$

Di mana,  $A_0$  adalah absorbansi reaksi kontrol dan  $A_1$  adalah absorbansi sampel itu. Nilai  $IC_{50}$  (Konsentrasi ekstrak yang menyebabkan 50% scavenging) ditentukan dari grafik persentase efek scavenging terhadap konsentrasi ekstrak.

#### **2.2.4. Analisa Data**

Data dianalisis menggunakan IBM SPSS Statistics versi 31. Analisis univariat dilakukan dengan Linear Mixed Model (LMM) untuk mengevaluasi efek utama jenis pengawet, konsentrasi pengawet, waktu penyimpanan, serta interaksi di antara ketiganya. Korelasi Pearson digunakan untuk mengidentifikasi hubungan linier antar-parameter fisikokimia dan bioaktif. Selanjutnya, Analisis Komponen Utama (Principal Component Analysis, PCA) diterapkan untuk mereduksi dimensi data, mengidentifikasi variabel yang paling berkontribusi, dan memvisualisasikan pengelompokan sampel. Grafik PCA dua dimensi (score dan loading plot) dihasilkan menggunakan OriginPro 2025b untuk menggambarkan hubungan antar-parameter serta pola perubahan selama penyimpanan.

### **2.3. Hasil dan Pembahasan**

#### **2.3.1. Perubahan sifat fisik nira aren**

Analisis statistik *linear mixed method* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan terhadap perubahan sifat fisik nira aren setelah pemanasan ohmic dan selama penyimpanan. Parameter yang dianalisis meliputi pH, kekeruhan, total padatan terlarut (TPT/TSS), gula invert, serta atribut warna  $L^*$ ,  $a^*$ , dan  $b^*$ . Pengujian mencakup tiga faktor utama, yaitu jenis pengawet (kunyit, akar kayu bayur, dan tanpa pengawet sebagai kontrol), level konsentrasi pengawet (5, 10, dan 15 g/L), dan waktu penyimpanan (0–8 jam), beserta interaksi dua arah dan tiga arah di antara ketiganya. Ringkasan nilai signifikansi (p-value) untuk setiap kombinasi sumber variasi dan parameter disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Ringkasan hasil analisis varians terhadap sifat fisik nira aren

Sumber Variasi	pH	Kekeruhan	TPT (TSS)	Gula Invert	L*	a*	b*
Pengawet	0.010**	<0.001***	0.590 <sup>ns</sup>	0.616 <sup>ns</sup>	<0.001***	0.265 <sup>ns</sup>	0.081 <sup>ns</sup>
Konsentrasi	0.329 <sup>ns</sup>	<0.001***	0.507 <sup>ns</sup>	0.393 <sup>ns</sup>	0.720 <sup>ns</sup>	0.354 <sup>ns</sup>	0.026*
Waktu	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	0.003**	<0.001***	<0.001***
Pengawet × Konsentrasi	0.951 <sup>ns</sup>	<0.001***	0.937 <sup>ns</sup>	0.248 <sup>ns</sup>	0.844 <sup>ns</sup>	0.587 <sup>ns</sup>	0.185 <sup>ns</sup>
Pengawet × Waktu	0.003**	<0.001***	1.000 <sup>ns</sup>	0.993 <sup>ns</sup>	0.964 <sup>ns</sup>	0.874 <sup>ns</sup>	0.996 <sup>ns</sup>
Konsentrasi × Waktu	0.038*	<0.001***	0.999 <sup>ns</sup>	0.868 <sup>ns</sup>	1.000 <sup>ns</sup>	0.977 <sup>ns</sup>	0.990 <sup>ns</sup>
Pengawet × Konsentrasi × Waktu	0.731 <sup>ns</sup>	<0.001***	1.000 <sup>ns</sup>	1.000 <sup>ns</sup>	1.000 <sup>ns</sup>	0.702 <sup>ns</sup>	1.000 <sup>ns</sup>

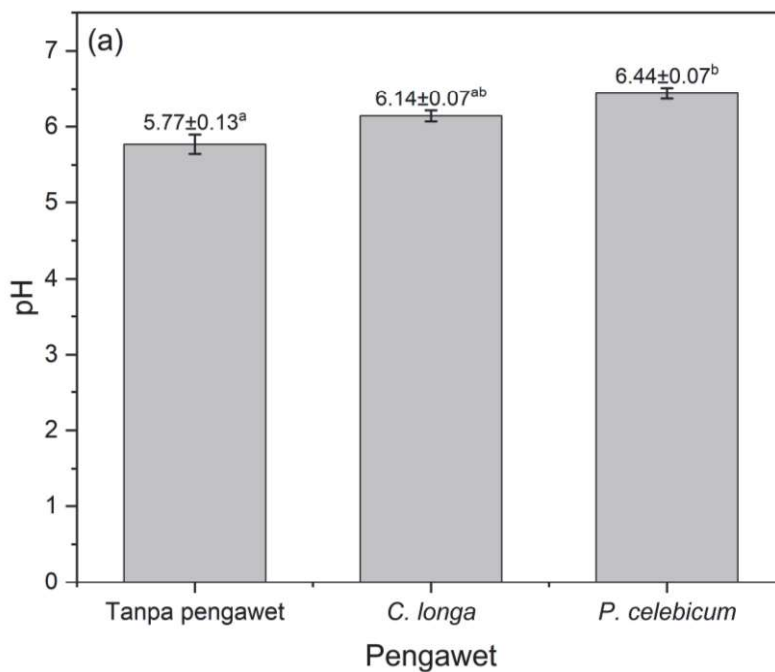
Secara umum, hasil analisis memperlihatkan bahwa waktu penyimpanan merupakan faktor yang paling konsisten berpengaruh nyata terhadap hampir semua parameter yang diamati. Waktu memberikan pengaruh sangat nyata terhadap pH, kekeruhan, TPT, gula invert, serta koordinat warna a\* dan b\*, dan berpengaruh nyata terhadap L\*. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan yang terjadi selama 8 jam penyimpanan setelah perlakuan sangat menentukan dinamika keasaman, kejernihan, kandungan padatan, gula reduksi, dan karakteristik warna nira aren. Di samping itu, jenis pengawet juga menunjukkan peran yang jelas, terutama pada pH, kekeruhan, dan kecerahan warna L\*, sedangkan pengaruhnya terhadap TPT, gula invert, dan koordinat warna lainnya relatif terbatas. Konsentrasi pengawet tampak tidak dominan untuk sebagian besar parameter, namun tetap memberikan pengaruh kuat pada kekeruhan dan pengaruh nyata pada b\*, sehingga variasi level konsentrasi terutama tercermin pada kejernihan dan nuansa kekuningan nira.

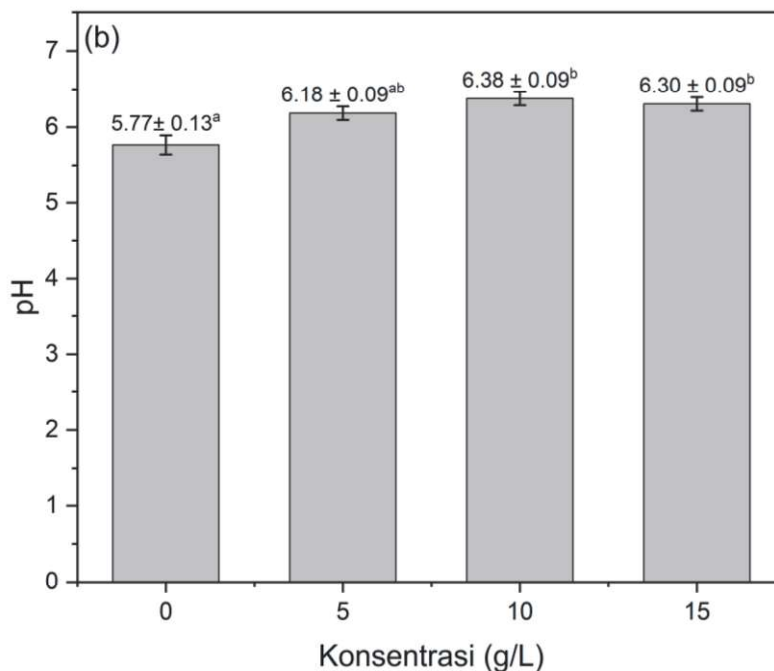
Dari sisi interaksi, kekeruhan muncul sebagai parameter yang paling sensitif terhadap kombinasi perlakuan. Hampir semua bentuk interaksi (pengawet × konsentrasi, pengawet × waktu, konsentrasi × waktu, dan interaksi tiga arah) menunjukkan pengaruh yang sangat nyata terhadap kekeruhan, menandakan bahwa kejernihan nira dipengaruhi secara bersama-sama oleh jenis pengawet, dosis yang digunakan, dan lamanya penyimpanan. Pada pH, interaksi pengawet × waktu dan konsentrasi × waktu juga signifikan, sehingga pengaruh kedua faktor tersebut terhadap keasaman tidak bersifat konstan sepanjang waktu. Sebaliknya, untuk TPT, gula invert, dan sebagian atribut warna, pengaruh interaksi relatif lebih kecil dan pola perubahannya lebih banyak dikendalikan oleh efek utama, terutama waktu penyimpanan.

## pH

Pengukuran pH merupakan parameter penting dalam menilai kesegaran nira dari tanaman araceae seperti *A. pinnata* dan *Borrassus flabellifer* dan *Cocos nucifera*. pH adalah parameter kunci dalam menentukan kesegaran nira, karena memengaruhi stabilitas gula, proses fermentasi, perubahan warna, dan kelayakan nira sebagai bahan baku produk olahan selanjutnya (Hebbar et al., 2015; Jaraee et al., 2023; Wiboonsirikul et al., 2024).

Hasil uji *Type III Tests of Fixed Effects* menggunakan *Linear Mixed Method* menunjukkan bahwa jenis pengawet (kontrol tanpa pengawet, rimpang *Curcuma longa*, dan akar *Pterospermum celebicum*) dan waktu penyimpanan berpengaruh signifikan terhadap pH nira aren (masing-masing  $p = 0,010$  dan  $p < 0,001$ ). Interaksi jenis pengawet  $\times$  waktu dan konsentrasi  $\times$  waktu juga signifikan ( $p = 0,003$  dan  $p = 0,038$ ), sedangkan efek utama konsentrasi pengawet (5, 10, dan 15 g/L, dengan kontrol 0 g/L) serta interaksi pengawet  $\times$  konsentrasi dan pengawet  $\times$  konsentrasi  $\times$  waktu tidak signifikan ( $p > 0,05$ ). Sehingga pengaruh konsentrasi harus dilihat dalam kaitannya dengan lamanya penyimpanan. Pola perubahan pH tersebut diuraikan lebih lanjut berdasarkan nilai *estimated marginal means* yang disajikan pada Gambar 2.1 dan 2.2. Notasi signifikansi perbedaan didapatkan dari hasil *post hoc pairwise comparison* dengan koreksi *Bonferroni*.



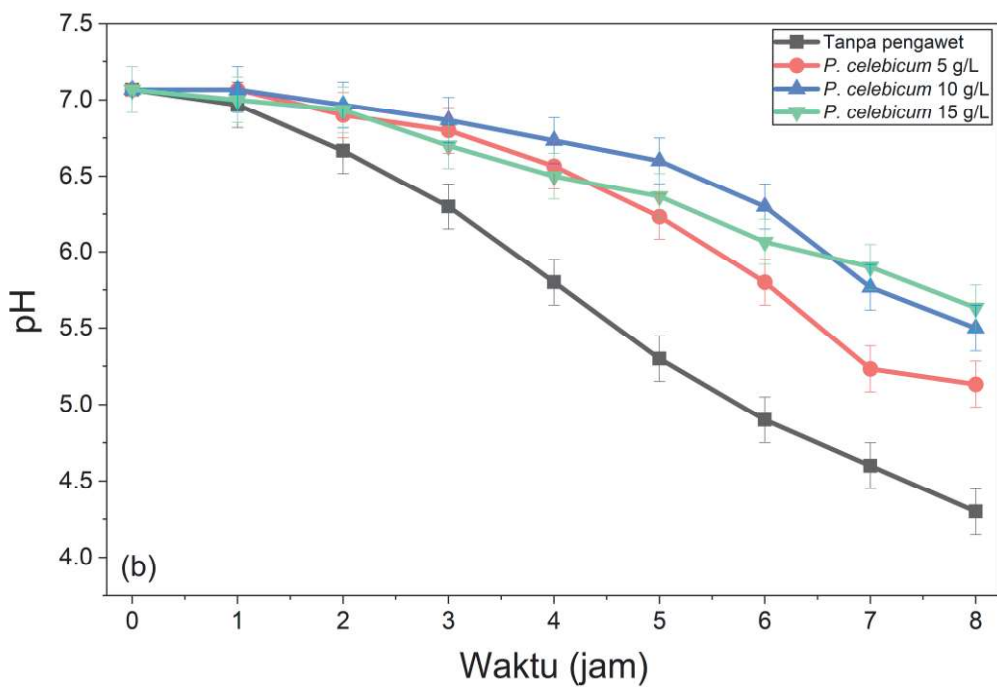
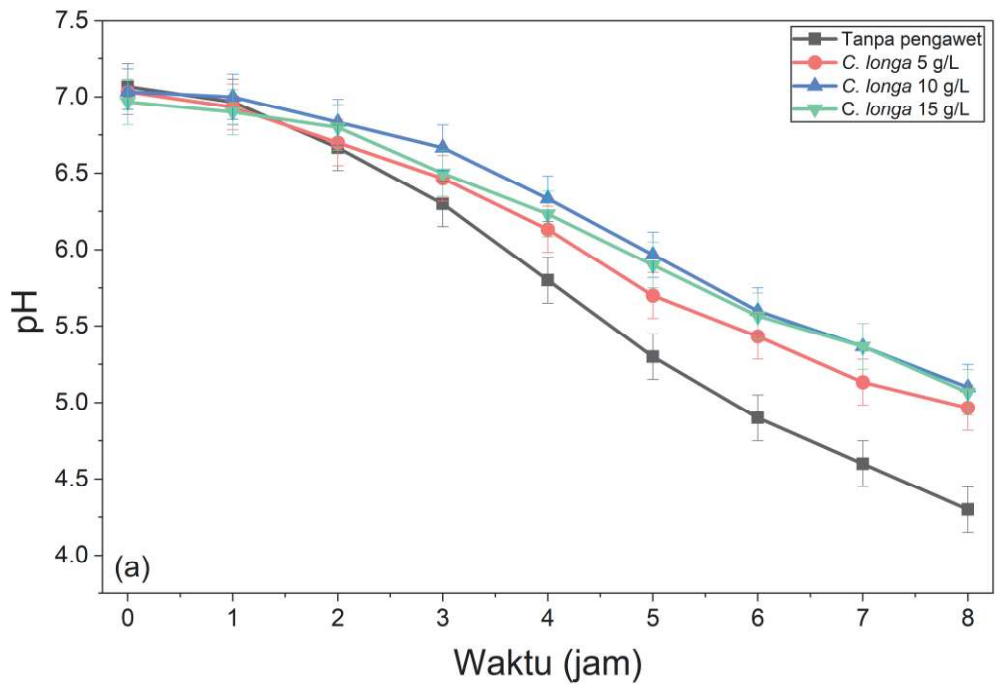


Gambar 2.1. Rata-rata pH nira aren pada berbagai jenis pengawet (a), dan konsentrasi pengawet (b).

Gambar 2.1.(a) memperlihatkan pengaruh utama jenis pengawet terhadap pH rata-rata nira aren. Rata-rata pH kontrol tanpa pengawet hanya sekitar 5,77<sup>a</sup>, sedangkan penambahan rimpang *C. longa* meningkatkan pH menjadi sekitar 6,14<sup>ab</sup>. Nilai pH tertinggi diperoleh pada perlakuan akar *P. celebicum*, yakni sekitar 6,44<sup>b</sup>. Notasi huruf menunjukkan bahwa pH kontrol berbeda nyata dengan perlakuan *P. celebicum*, sementara *C. longa* berada pada posisi intermediat dan tidak berbeda signifikan dari kedua perlakuan lainnya. Secara absolut, selisih pH antar jenis pengawet berkisar 0,3–0,7 satuan, namun perbedaan ini cukup bermakna secara statistik dan mengindikasikan bahwa kedua bahan pengawet nabati tersebut mampu menekan laju penurunan pH dibandingkan tanpa pengawet, dengan efektivitas sedikit lebih tinggi pada *P. celebicum*. Kemampuan *C. longa* dan *P. celebicum* mempertahankan pH yang lebih tinggi diduga terkait kandungan senyawa bioaktif yang secara efektif sehingga menghambat pertumbuhan mikroorganisme penghasil asam pada nira. Penggunaan bahan tambahan untuk menghambat laju perubahan pH nira telah dilakukan seperti penggunaan lime dan Chengal wood (*Neobalanocarpus heimii*). Bahan-bahan tersebut membantu mempertahankan pH nira dengan menurunkan jumlah mikroba sehingga menghambat proses fermentasi spontan pada nira (Raghu & Joseph, 2020)(Saidan et al., 2020). Di Indonesia, daun manggis hutan, kayu nangka dan kulit batang manggis dilaporkan juga memiliki manfaat dalam menjaga kesegaran nira aren (Elvina et al., 2020c; Fitriyani et al., 2014; Lantemona et al., 2023c; Syahidah et al., 2021). Hasil penelitian ini turut menguatkan bahwa untuk menjaga perubahan pH menjadi lebih lambat, penggunaan pengawet seperti akar kayu bayur dan rimpang kunyit dapat menjadi solusi di lapangan.

Gambar 2.1b menyajikan pengaruh konsentrasi pengawet terhadap pH rata-rata. Terlihat kecenderungan respons dosis: pH meningkat dari 5,77<sup>a</sup> pada kontrol tanpa pengawet (0 g/L) menjadi 6,18<sup>ab</sup> pada 5 g/L, kemudian naik lagi menjadi 6,38<sup>b</sup> pada 10 g/L dan sedikit menurun menjadi 6,30<sup>b</sup> pada 15 g/L. Notasi huruf menunjukkan bahwa konsentrasi 10 dan 15 g/L berbeda nyata dari kontrol, sedangkan 5 g/L masih berada pada posisi transisi, tidak berbeda signifikan baik dengan kontrol maupun dengan konsentrasi yang lebih tinggi. Secara praktis, hal ini menunjukkan bahwa penambahan pengawet pada konsentrasi  $\geq 10$  g/L memberikan keuntungan nyata dalam mempertahankan pH nira. Namun, karena efek utama konsentrasi dalam model global tidak signifikan, maka manfaat peningkatan konsentrasi ini diduga terutama muncul pada waktu penyimpanan tertentu.

Perubahan pH nira aren selama penyimpanan 0–8 jam setelah penyadapan ditampilkan pada Gambar 2.2(a–b). Semua kurva menunjukkan tren penurunan pH yang konsisten seiring bertambahnya waktu simpan, baik pada kontrol maupun pada nira dengan pengawet. Pada 0–1 jam, pH masih relatif stabil di kisaran 7,0–7,1; uji lanjut Bonferroni menunjukkan bahwa perbedaan antara 0 dan 1 jam belum signifikan. Mulai jam ke-2, pH sudah berbeda nyata dibandingkan kondisi awal, dan selisih pH antarjam berikutnya terus meningkat signifikan hingga jam ke-8. Secara kumulatif, pH rata-rata turun sekitar 1,9 satuan dari awal hingga akhir penyimpanan, menegaskan bahwa waktu merupakan determinan utama peningkatan keasaman nira aren. Penurunan pH ini mencerminkan fermentasi spontan oleh mikroflora alami yang mengonversi gula menjadi asam organik. Penggunaan pengawet alami seperti *P. celebicum*. dan *C. longa* menunjukkan kemampuan dalam memperlambat proses ini, meskipun efektivitasnya bergantung pada dosis. Studi sebelumnya melaporkan bahwa rimpang kunyit menunjukkan aktivitas antibakteri yang kuat terhadap berbagai strain bakteri, termasuk *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, dan *Klebsiella pneumoniae* (Gupta et al., 2015; Luo & Yang, 2014; Niamsa N. & Sittiwet C., 2009). Ekstrak air *C. longa* telah menunjukkan aktivitas antimikroba yang efektif dengan Konsentrasi Inhibisi Minimum (MIC) berkisar antara 4–16 g/L dan Konsentrasi Bakterisidal Minimum (MBC) antara 16–32 g/L (Niamsa N. & Sittiwet C., 2009). Senyawa bioaktif utama yang bertanggung jawab atas sifat-sifat ini adalah kurkuminoid, yang meliputi *kurkumin*, *demetoksikurkumin*, dan *bisdemetoksikurkumin* (Luo & Yang, 2014; Mandal et al., 2023; Tonin et al., 2021; Zaporozhchenko & Subotyalov, 2023). Sementara kayu merah, meskipun pada varietas yang berbeda, menunjukkan kemampuan penghambatan pertumbuhan *Pseudomonas aeruginosa*, *Streptococcus mutans*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* (Marzuki et al., 2016) dan *Shigella boydii* (Salempa et al., 2014). Komponen seperti fenolik dan flavanoid diduga bertanggung jawab terhadap sifat-sifat ini (Hidayathulla et al., 2011; Shetty et al., 2011). Hasil penelitian ini, dimana stabilitas pH yang lebih tinggi pada konsentrasi 10 g/L dan 15 g/L menunjukkan bahwa dosis optimal berkontribusi terhadap efek penghambatan fermentasi. Namun, *C. longa* pada konsentrasi 5–10 g belum memberikan efek yang setara dengan *P. celebicum*., mengindikasikan adanya perbedaan potensi antimikroba dari kedua pengawet yang digunakan.



Gambar 2.2. Perubahan rata rata pH nira aren selama penyimpanan yang dipengaruhi yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan.

Pada kontrol tanpa pengawet, penurunan berlangsung paling cepat sehingga pada jam ke-8 pH mencapai sekitar 4,3. Kondisi tersebut mengindikasikan aktivitas mikroba yang intensif dan berpotensi mempercepat kerusakan nira atau mengarahkan fermentasi ke produk yang tidak diinginkan bila tidak segera diolah. Stabilitas dan umur simpan nira secara signifikan dipengaruhi oleh perubahan pH. Degradasi gula dan peningkatan keasaman di bawah kondisi ambien dapat menyebabkan kerusakan nira yang lebih cepat (Pandiselvam et al., 2021). (Ansar et al., 2022; Victor et al., 2023), telah melaporkan bahwa nira aren yang baru disadap biasanya memiliki pH yang mendekati netral, sekitar 7.0 hingga 8, tetapi pH selanjutnya akan menurun secara signifikan selama penyimpanan. Selama penyimpanan 10 jam, pH nira aren turun dari angka 7,0 menjadi 2,6 pada suhu 45°C dan pada suhu 30°C menjadi 4.8 (Ansar et al., 2022). Meskipun Victor menyatakan bahwa nira dapat tetap segar tanpa penggunaan pengawet selama 12 jam jika praktik higienis diterapkan selama penyadapan dan pengumpulan tetapi pada kenyataannya kondisi di lapangan dimana tanaman aren banyak tumbuh di dalam hutan di Indonesia, proses sterilisasi dan hygiene masih belum dilakukan dengan baik sehingga penggunaan bahan pengawet alami dapat menjadi alternatif dalam mempertahankan pH nira aren.

Interaksi jenis pengawet  $\times$  waktu terlihat jelas pada Gambar 2.3(a–b). Pada 0–2 jam, kurva pH semua perlakuan masih berdekatan, menandakan bahwa perbedaan jenis pengawet belum menghasilkan efek nyata. Setelah jam ke-3, garis kontrol mulai menurun lebih curam dibandingkan semua perlakuan dengan pengawet. Pada jam ke-5 hingga ke-8, pH kontrol berada sekitar 0,7–1,0 satuan lebih rendah dibandingkan nira yang diberi pengawet.

Pada kelompok *C. longa* (Gambar 2.2.a), semua konsentrasi (5, 10, dan 15 g/L) mampu mempertahankan pH di atas 5.0 hingga jam ke-8, sementara kontrol telah turun hingga sekitar 4.3. Pola serupa tampak pada kelompok *P. celebicum* (Gambar 2.2(b)), dengan pemisahan kurva yang lebih jelas pada jam-jam akhir, terutama pada konsentrasi 15 g/L yang masih berada di sekitar pH 5.6–5.7 pada jam ke-8. Pola ini konsisten dengan signifikansi interaksi pengawet  $\times$  waktu, dan menunjukkan bahwa efektivitas pengawet alami semakin menonjol pada fase penyimpanan menengah hingga akhir ketika laju produksi asam oleh mikroorganisme meningkat.

Interaksi konsentrasi  $\times$  waktu juga terlihat dari jarak antar kurva pada Gambar 2.3 Pada 0–2 jam, kurva pH untuk konsentrasi 5, 10, dan 15 g/L pada masing-masing jenis pengawet hampir bertumpuk, menunjukkan bahwa pada fase awal peningkatan konsentrasi belum memberikan perbedaan pH yang mencolok; penurunan pH awal lebih didominasi oleh dinamika fermentasi umum. Memasuki jam ke-4 hingga ke-8, efek konsentrasi menjadi lebih jelas. Pada kelompok *C. longa* (Gambar 2.3.(a)), konsentrasi 10 dan 15 g/L cenderung mempertahankan pH sekitar 0,1–0,2 satuan lebih tinggi dibandingkan 5 g/L pada jam-jam akhir, meskipun perbedaan absolutnya relatif kecil. Pada kelompok *P. celebicum* (Gambar 2.3.(b)), pemisahan kurva antar konsentrasi lebih nyata: pada jam ke-8, pH nira dengan 15 g/L *P. celebicum* sekitar 0.4–0.5 satuan lebih tinggi dibandingkan 5 g/L. Hasil ini mendukung signifikansi interaksi konsentrasi  $\times$  waktu dan menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi pengawet terutama bermanfaat pada fase akhir penyimpanan, ketika populasi mikroba dan akumulasi asam telah meningkat. Interaksi pengawet  $\times$  konsentrasi dan pengawet  $\times$  konsentrasi  $\times$  waktu tidak signifikan.

Hal ini menunjukkan, meskipun *P. celebicum* secara umum cenderung memberikan pH sedikit lebih tinggi dibandingkan *C. longa*, pola respons terhadap peningkatan konsentrasi relatif serupa pada kedua jenis pengawet, dan tidak terdapat kombinasi spesifik antara pengawet, konsentrasi, dan waktu.

Stabilitas dan umur simpan nira secara signifikan dipengaruhi oleh perubahan pH. Degradasi gula dan peningkatan keasaman di bawah kondisi ambien dapat menyebabkan pembusukan yang lebih cepat (Pandiselvam et al., 2021). Ansar et al dan Victor et al (Ansar et al., 2022; Victor et al., 2023), telah melaporkan bahwa nira aren yang baru disadap biasanya memiliki pH yang mendekati netral, sekitar 7,0 hingga 8, tetapi pH selanjutnya akan menurun secara signifikan selama penyimpanan. Selama penyimpanan 10 jam, pH nira aren turun dari angka 7.0 menjadi 2.6 pada suhu 45°C dan pada suhu 30°C menjadi 4.8 (Ansar et al., 2022). Meskipun Victor (2023) menyatakan bahwa nira dapat tetap segar tanpa penggunaan pengawet selama 12 jam jika praktik higienis diterapkan selama penyadapan dan pengumpulan tetapi pada kenyataannya kondisi di lapangan dimana tanaman aren banyak tumbuh di dalam hutan di Indonesia, proses sterilisasi dan hygiene masih belum dilakukan dengan baik sehingga penggunaan bahan pengawet alami dapat menjadi alternatif dalam mempertahankan pH nira aren.

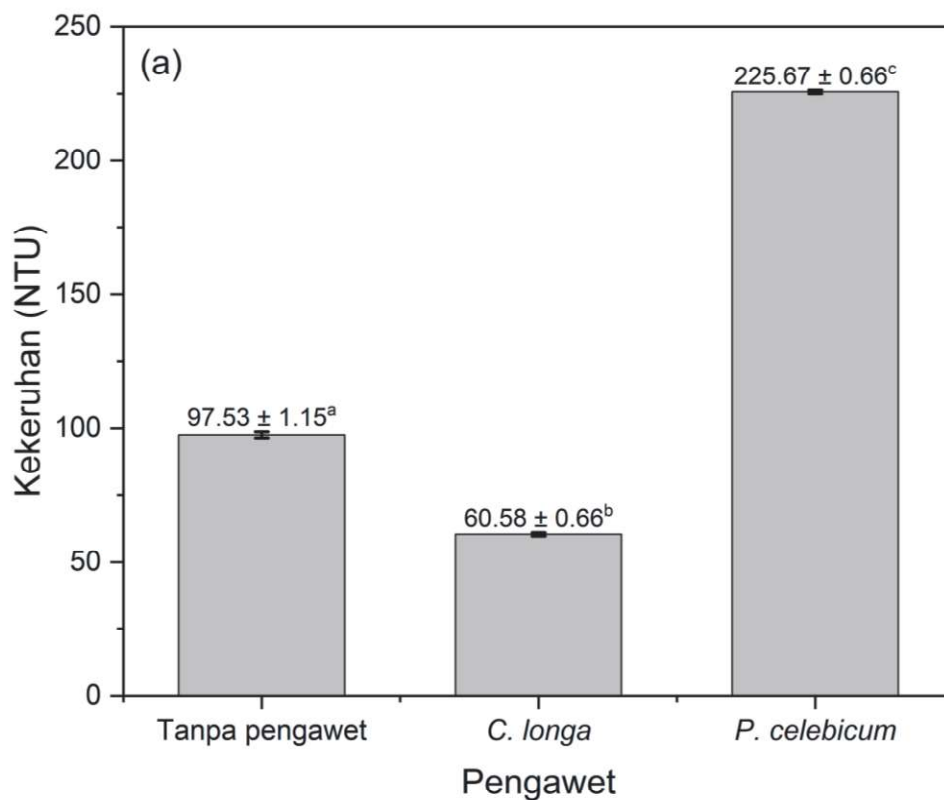
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa waktu penyimpanan merupakan faktor utama yang mengontrol penurunan pH nira aren, sedangkan penambahan pengawet alami dari rimpang *C. longa* dan akar *P. celebicum* secara nyata memperlambat proses pengasaman, terutama pada konsentrasi  $\geq 10$  g/L dan pada fase penyimpanan menengah hingga akhir. Kontrol tanpa pengawet mengalami penurunan pH tercepat dan mencapai kisaran pH  $< 4.5$  dalam 8 jam, sedangkan nira dengan pengawet masih bertahan pada pH sekitar 5.0–5.7. Perbedaan ini penting secara statistik maupun praktis, karena pH yang lebih tinggi pada awal hingga pertengahan penyimpanan memperpanjang peluang pengolahan lebih lanjut dan menurunkan risiko pembentukan cita rasa dan aroma yang tidak diinginkan akibat fermentasi spontan yang tidak terkontrol.

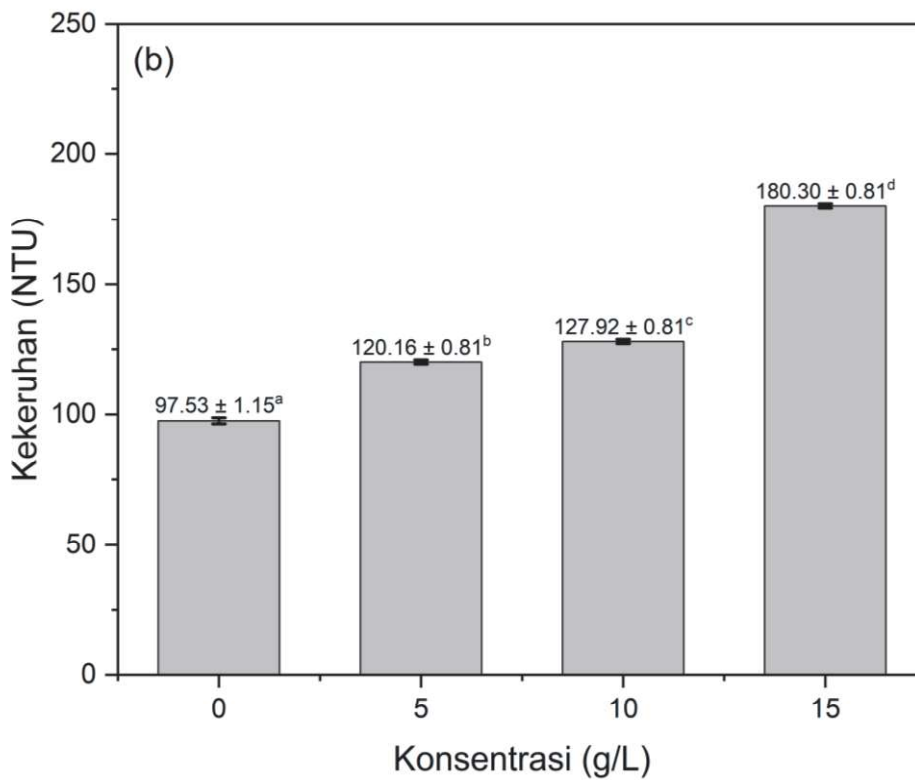
### **Kekeruhan**

Nilai kekeruhan adalah ukuran kekeruhan atau keburaman cairan yang disebabkan adanya partikel tersuspensi yang menyebarkan cahaya (Mbonu et al., 2022). Kekeruhan adalah kebalikan dari kejernihan dan diukur dalam Nephelometric Turbidity Units (NTU) (Pérez et al., 2009; Stevenson & Bravo, 2019). Dalam industri makanan, kekeruhan adalah salah satu parameter yang digunakan untuk menilai kualitas makanan cair, misalnya anggur, dimana hal ini menunjukkan adanya partikel yang dapat mempengaruhi proses fermentasi dan kualitas produk secara keseluruhan (Pérez et al., 2009). Kekeruhan juga digunakan untuk menilai kestabilan partikel cairan selama penyimpanan (A. Sharma et al., 2022). Dalam penelitian ini, nilai kekeruhan yang diukur selama 8 jam pasca penyadapan yang menunjukkan bagaimana pengaruh perlakuan bahan alam terhadap kekeruhan nira.

Hasil uji *Type III Tests of Fixed Effects* pada model campuran linear menunjukkan bahwa semua faktor utama—jenis pengawet, konsentrasi pengawet, dan waktu penyimpanan—berpengaruh sangat signifikan terhadap kekeruhan nira aren ( $p <$

0,001). Demikian pula, seluruh interaksi, baik dua arah (pengawet × konsentrasi, pengawet × waktu, konsentrasi × waktu) maupun tiga arah (pengawet × konsentrasi × waktu), juga signifikan ( $p < 0,001$ ). Temuan ini mengindikasikan bahwa perubahan kekeruhan nira aren merupakan hasil kombinasi yang kompleks antara jenis bahan pengawet, besar dosis, dan lamanya penyimpanan. Pola-pola tersebut diuraikan lebih rinci berdasarkan nilai *estimated marginal means* yang disajikan pada Gambar 2.3 dan 2.4. Notasi signifikansi perbedaan didapatkan dari hasil *post hoc pairwise comparison* dengan koreksi Bonferroni.





Gambar 2.3. Rata-rata kekeruhan nira aren pada berbagai jenis pengawet (a), dan konsentrasi pengawet (b).

Gambar 2.3(a) menunjukkan pengaruh utama jenis pengawet terhadap kekeruhan rata-rata nira aren. Kontrol tanpa pengawet memiliki kekeruhan sekitar 97.53 NTU, sedangkan penambahan rimpang *Curcuma longa* justru menurunkan kekeruhan menjadi sekitar 60.58 NTU. Sebaliknya, perlakuan akar *Pterospermum celebicum* menghasilkan kekeruhan tertinggi, yaitu sekitar 225.67 NTU. Notasi huruf pada grafik menunjukkan bahwa ketiga perlakuan berbeda nyata satu sama lain (a, b, c), sehingga dapat dikatakan bahwa jenis pengawet memodifikasi karakter optik nira dengan cara yang sangat berbeda. Secara fisiologis, penurunan kekeruhan pada perlakuan *C. longa* mengindikasikan adanya efek klarifikasi, yang kemungkinan berkaitan dengan kemampuan senyawa fenolik dan komponen bioaktif lain untuk mengikat partikel koloid atau menghambat pertumbuhan mikroorganisme yang berkontribusi terhadap pembentukan sedimen dan partikel tersuspensi. Sebaliknya, peningkatan kekeruhan yang sangat tinggi pada *P. celebicum* terutama disebabkan oleh masuknya partikel-partikel padatan dari bahan pengawet itu sendiri (serat, fragmen jaringan kayu bayur) ke dalam sistem nira. Dengan demikian, secara rata-rata *C. longa* cenderung menghasilkan nira yang lebih jernih, sedangkan *P. celebicum* memberikan nira yang jauh lebih keruh walaupun pada saat yang sama berperan sebagai pengawet. Hasil ini memperlihatkan bahwa penggunaan rimpang kunyit lebih memberi pengaruh nira yang lebih jernih dibandingkan penggunaan akar kayu bayur. Meskipun demikian, kejernihan tersebut

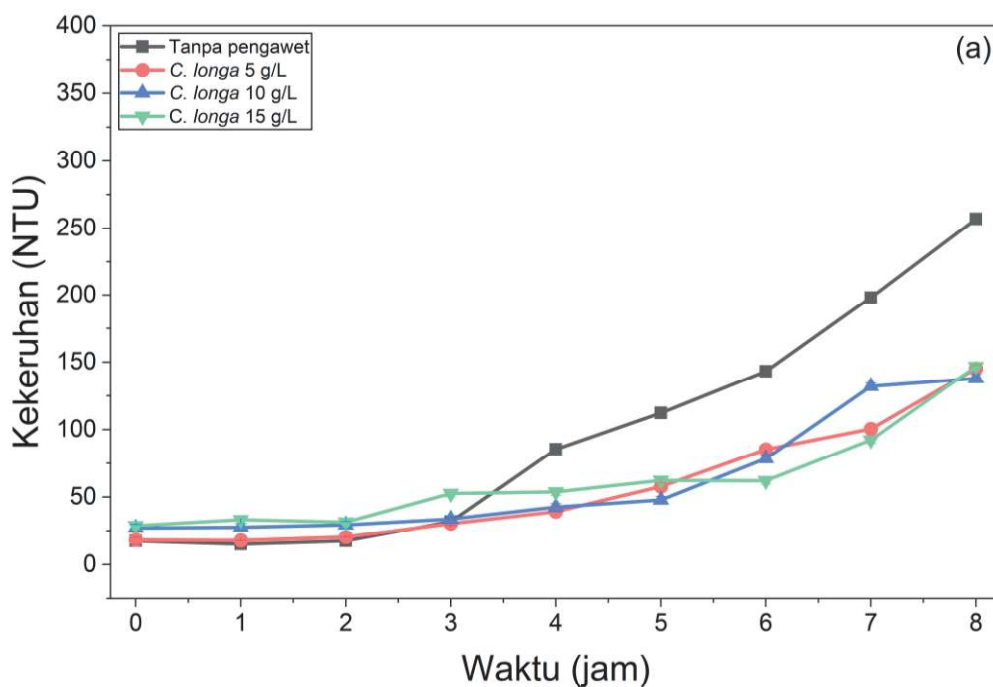
tetap berubah menjadi lebih keruh pada penyimpanan yang lebih lama. Kondisi ini mencerminkan terjadinya presipitasi atau agregasi partikel koloid seperti protein, polisakarida, atau pertumbuhan mikroba selama penyimpanan pada suhu ruang. Ini mengonfirmasi bahwa stabilitas nira tanpa pengawet sangat rendah.

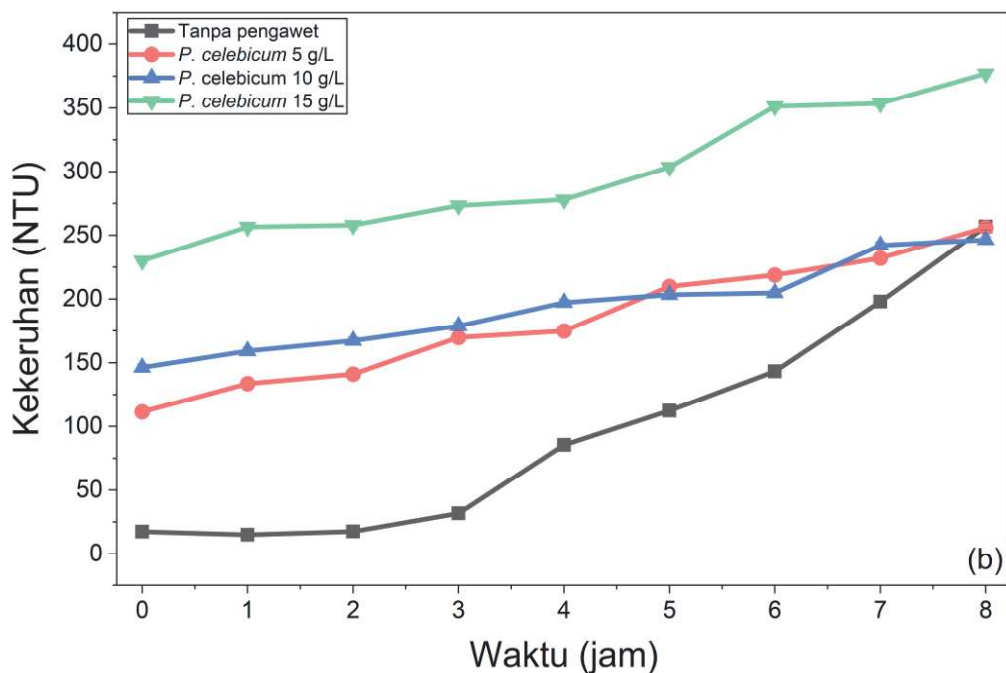
Pengaruh utama konsentrasi pengawet terhadap kekeruhan ditampilkan pada Gambar 2.3(b). Kekeruhan rata-rata nira tanpa pengawet (0 g/L) sebesar 97,53<sup>a</sup> NTU. Penambahan pengawet 5 g/L meningkatkan kekeruhan menjadi 120,16<sup>b</sup> NTU, dan pada 10 g/L naik lagi menjadi 127,92<sup>c</sup> NTU. Konsentrasi 15 g/L menghasilkan kekeruhan tertinggi, yaitu 180,30<sup>b</sup> NTU. Notasi huruf menunjukkan bahwa 0 g/L berbeda nyata dari semua konsentrasi yang mengandung pengawet, sementara 10 g/L (huruf c) juga berbeda dari 5 dan 15 g/L (huruf b). Secara keseluruhan, pola ini menggambarkan adanya respons dosis, di mana peningkatan konsentrasi pengawet diikuti oleh kenaikan kekeruhan rata-rata. Namun demikian, karena dalam model utama seluruh interaksi dengan konsentrasi juga signifikan, pola peningkatan kekeruhan ini tidak terjadi secara seragam pada semua jenis pengawet dan semua titik waktu. Oleh karena itu, interpretasi peran konsentrasi lebih tepat dilakukan dalam konteks dinamika kekeruhan sepanjang penyimpanan.

Perubahan kekeruhan nira aren selama penyimpanan 0–8 jam disajikan pada Gambar 2.4(a–b). Secara umum, semua kurva menunjukkan tren peningkatan kekeruhan yang progresif seiring bertambahnya waktu simpan. Pada jam ke-0, kekeruhan masih relatif rendah (sekitar 20–30 NTU untuk kontrol dan perlakuan *C. longa*, dan lebih tinggi untuk *P. celebicum*), kemudian meningkat tajam hingga jam ke-8. Hasil *post hoc pairwise comparison* dengan koreksi Bonferroni menegaskan bahwa hampir seluruh pasangan waktu berbeda nyata ( $p < 0,001$ ). Antara 0 dan 1 jam, peningkatan kekeruhan sekitar 9 NTU sudah signifikan. Perbedaan antara 1 dan 2 jam merupakan satu-satunya pasangan yang tidak signifikan, yang mengindikasikan adanya fase transisi singkat di awal penyimpanan. Setelah jam ke-2, semua perbandingan antar waktu menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan, dengan selisih kekeruhan yang terus membesar hingga mencapai sekitar 141 NTU antara 0 dan 8 jam. Temuan ini menegaskan bahwa waktu penyimpanan merupakan faktor dominan yang mengontrol peningkatan kekeruhan nira aren, sejalan dengan akumulasi partikel tersuspensi akibat pertumbuhan mikroba, pembentukan agregat koloid, dan kemungkinan terjadinya reaksi kimia yang menghasilkan padatan halus. Tapsoba, et al (Tapsoba et al., 2016) melaporkan bahwa kekeruhan pada proses pengolahan palm wine meningkat seiring waktu dengan berkembangnya koloni bakteri dan jamur yang juga menurunkan kualitas organoleptik dan stabilitas wine. Fermentasi spontan oleh bakteri menghasilkan asam laktat dan asetat yang menurunkan pH, meningkatkan total acidity dan menyebabkan pembentukan partikel koloid. Wiboonsirikul (Wiboonsirikul, 2024) menyatakan bahwa kekeruhan nira palem sangat dipengaruhi oleh pH. nira dengan pH rendah (<5) memiliki partikel lebih besar dan peningkatan aktivitas lactic acid bacteria (LAB), yang menyebabkan turbiditas tinggi dan kesulitan dalam kristalisasi gula.

Interaksi antara jenis pengawet dan waktu penyimpanan tercermin jelas pada Gambar 2.4(a–b). Pada kelompok *C. longa* (Gambar 2.4a, kekeruhan awal semua perlakuan, baik kontrol maupun nira dengan pengawet, berada pada kisaran 20–35 NTU. Hingga jam ke-3, peningkatan kekeruhan masih relatif lambat dan perbedaan antar

perlakuan kecil. Setelah jam ke-3, kekeruhan kontrol meningkat jauh lebih tajam dibandingkan perlakuan dengan *C. longa*. Pada jam ke-8, kekeruhan kontrol mendekati 260 NTU, sedangkan kekeruhan nira dengan *C. longa* hanya sekitar 140–150 NTU. Dengan kata lain, pada akhir penyimpanan kekeruhan kontrol hampir dua kali lipat lebih tinggi daripada nira yang diberi pengawet kunyit, menunjukkan bahwa *C. longa* efektif menekan pembentukan partikel keruh selama fermentasi spontan. Kemampuan kunyit memperlambat kekeruhan nira diduga berhubungan dengan sifat kunyit sebagai antioksidan dan antimikroba. Ekstrak kunyit memiliki aktivitas antioksidan tinggi terutama dalam menangkal radikal hidroksil dan DPPH (C. Liu et al., 2018; Wu et al., 2024). Dari sisi antimikroba, kunyit menunjukkan efektivitas signifikan terhadap beberapa bakteri patogen, seperti *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus spp* dan *E. coli* (Odo et al., 2023; Wu et al., 2024). Selain itu kunyit memiliki kemampuan mengurangi kekeruhan karena kandungan kurkumin dan senyawa polifenolnya membantu menstabilkan partikel dalam larutan, mencegah pembentukan partikel besar, dan mendorong sedimentasi partikel kasar ke dasar wadah (Moideen et al., 2025). Aktivitas antioksidan dan antimikroba kunyit mencegah partikel baru penyebab kekeruhan terbentuk selama penyimpanan (Affno et al., 2023; S. Zhang & Wang, 2016)





Gambar 2.4. Perubahan rata rata kekeruhan nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

Pola yang berbeda terlihat pada kelompok *P. celebicum* (Gambar 2.4b). Pada jam ke-0, kekeruhan nira dengan *P. celebicum* sudah sangat tinggi, masing-masing sekitar 110–170 NTU (5–15 g/L), jauh di atas kontrol yang hanya sekitar 20 NTU. Selanjutnya, kekeruhan perlakuan *P. celebicum* meningkat secara bertahap sepanjang penyimpanan, sedangkan kekeruhan kontrol meningkat lebih tajam mulai jam ke-4. Pada jam ke-8, kekeruhan kontrol mencapai sekitar 240–250 NTU, sementara perlakuan *P. celebicum* 5 dan 10 g/L berada pada kisaran 240–260 NTU, dan 15 g/L mencapai sekitar 370–380 NTU. Hal ini menunjukkan bahwa *P. celebicum* memberikan dua efek sekaligus: (1) meningkatkan kekeruhan awal nira secara drastis karena penambahan partikel dari bahan kayu bayur, dan (2) tetap mempertahankan kekeruhan tinggi hingga akhir penyimpanan. Interaksi pengawet × waktu yang signifikan mencerminkan perbedaan pola ini: pada *C. longa* kekeruhan dikendalikan selama penyimpanan, sedangkan pada *P. celebicum* kekeruhan sudah tinggi sejak awal dan meningkat lebih lanjut seiring waktu.

Interaksi konsentrasi × waktu terlihat dari perubahan jarak antar kurva konsentrasi pada Gambar 2.4. Pada kelompok *C. longa*, peningkatan konsentrasi dari 5 menjadi 10 dan 15 g/L hanya menyebabkan perbedaan kekeruhan yang relatif kecil, terutama pada 0–3 jam di mana kurva masih berdekatan. Perbedaan antar konsentrasi baru lebih terlihat pada jam ke-6 hingga ke-8, ketika kekeruhan pada 10–15 g/L sedikit lebih tinggi (sekitar 0,1–0,2 kali) dibandingkan 5 g/L, tetapi semuanya tetap jauh lebih

rendah daripada kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa, untuk *C. longa*, konsentrasi lebih berperan pada fase akhir penyimpanan, tanpa mengubah fakta bahwa semua konsentrasi secara umum menekan kekeruhan dibandingkan tidak menggunakan pengawet. Sebaliknya, pada kelompok *P. celebicum* efek konsentrasi tampak jelas sejak awal. Pada jam ke-0 saja, kekeruhan meningkat dari sekitar 110 NTU (5 g/L) menjadi 150 NTU (10 g/L) dan lebih dari 220 NTU (15 g/L), dan perbedaan ini terus dipertahankan sepanjang penyimpanan. Pada jam ke-8, kekeruhan 15 g/L *P. celebicum* sekitar 100–130 NTU lebih tinggi dibandingkan 5 g/L. Pola ini memperjelas bahwa interaksi konsentrasi  $\times$  waktu tidak hanya mencerminkan kenaikan kekeruhan seiring penyimpanan, tetapi juga menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi pengawet tertentu (khususnya *P. celebicum*), semakin besar pula kekeruhan yang dipertahankan dari awal hingga akhir penyimpanan.

Signifikansi interaksi pengawet  $\times$  konsentrasi  $\times$  waktu menunjukkan bahwa pengaruh konsentrasi terhadap kekeruhan berbeda antar jenis pengawet pada setiap titik waktu. Pada *C. longa*, variasi konsentrasi menghasilkan perubahan kekeruhan yang relatif moderat dan baru menonjol pada jam-jam akhir, sedangkan pada *P. celebicum* peningkatan konsentrasi langsung tercermin sebagai lonjakan kekeruhan awal yang besar dan tetap tinggi sepanjang penyimpanan. Dengan demikian, kombinasi jenis pengawet, konsentrasi, dan waktu penyimpanan perlu dipertimbangkan secara simultan ketika mengevaluasi kejernihan nira. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kekeruhan nira aren meningkat tajam selama penyimpanan, sejalan dengan aktivitas mikrobiologis dan perubahan fisikokimia yang terjadi setelah pemanasan ohmik. Penambahan pengawet alami memberikan efek yang saling bertolak belakang terhadap kekeruhan: *C. longa* cenderung menghambat peningkatan kekeruhan dan menghasilkan nira yang lebih jernih dibandingkan kontrol, sedangkan *P. celebicum* justru meningkatkan kekeruhan secara drastis sejak awal, meskipun tetap berperan dalam mengendalikan aspek mutu lainnya (misalnya pH).

Dari sudut pandang praktik pengolahan, temuan ini menyiratkan adanya trade-off antara stabilitas mikrobiologis dan penampilan visual produk. Penggunaan *C. longa*, khususnya pada konsentrasi sedang hingga tinggi, lebih menguntungkan bila kejernihan nira menjadi pertimbangan utama. Sementara itu, *P. celebicum* mungkin lebih sesuai untuk formulasi produk di mana kekeruhan tinggi masih dapat diterima atau bahkan diinginkan (misalnya minuman tradisional yang secara organoleptik memang keruh), tetapi kurang ideal bila target produk adalah nira atau minuman berbasis nira yang tampak jernih.

### **Total Padatan Terlarut**

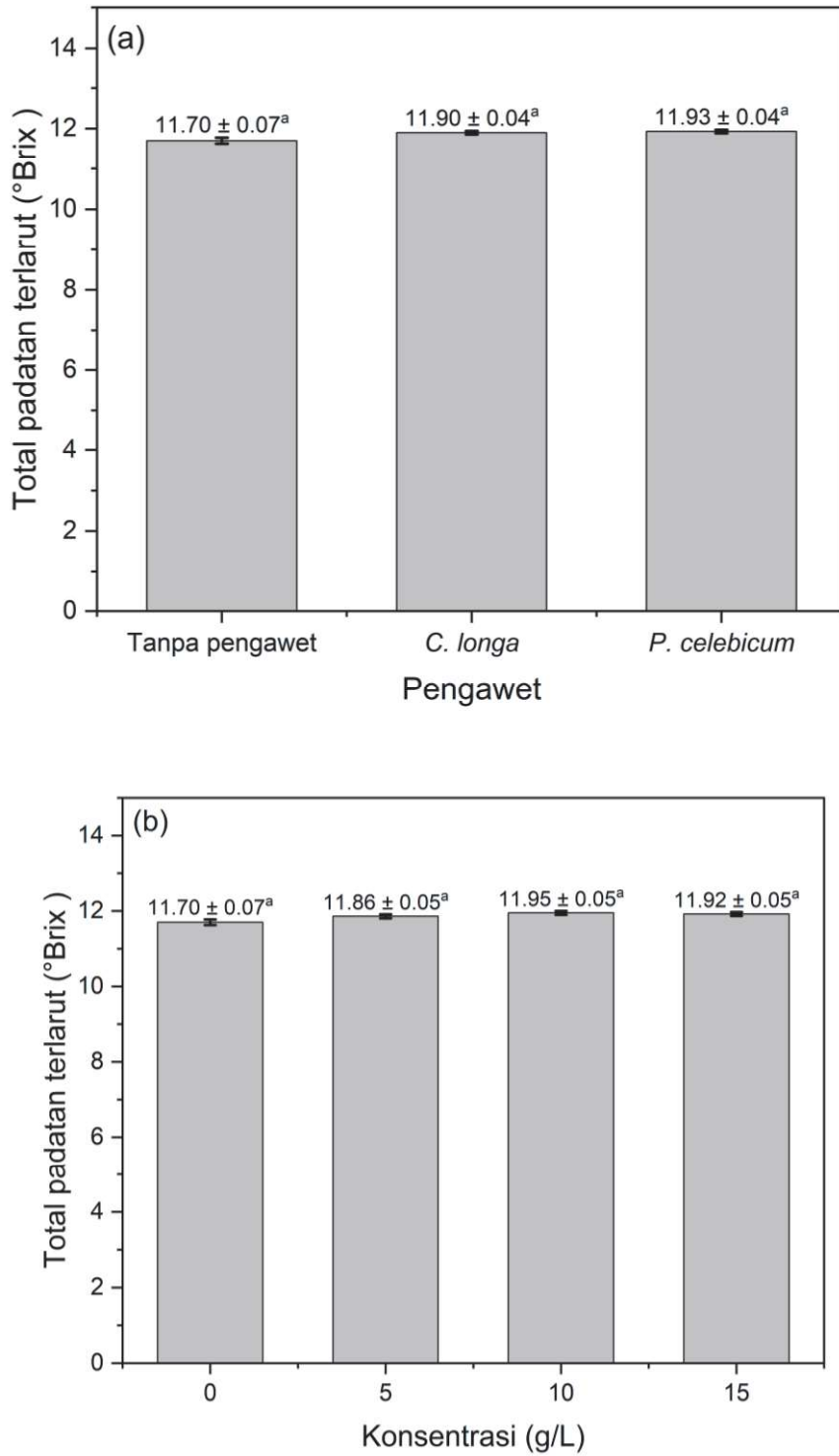
Pengukuran total padatan terlarut (TPT) penting dalam penilaian kualitas produk cair, terutama di industri makanan dan minuman. TPT, yang sering diukur dalam derajat Brix, mewakili konsentrasi gula terlarut, asam, protein, dan bahan terlarut lainnya dalam suatu cairan (Assous et al., 2014). Hasil *Type III Tests of Fixed Effects* pada analisa Linear Mixed Method, menunjukkan bahwa waktu penyimpanan berpengaruh signifikan terhadap total padatan terlarut nira aren ( $p < 0,001$ ), sedangkan jenis pengawet, konsentrasi pengawet, maupun seluruh interaksi di antara ketiganya tidak berbeda nyata ( $p > 0,05$ ). Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan TPT selama penyimpanan

terutama dikendalikan oleh lamanya waktu simpan, sementara variasi jenis dan konsentrasi pengawet yang digunakan pada penelitian ini tidak memberikan perbedaan yang berarti. Pola ini terlihat berdasarkan nilai *estimated means* yang ditampilkan pada Gambar 2.5 dan hasil *post hoc pairwise comparison* dengan koreksi Bonferroni.

Gambar 2.5a memperlihatkan pengaruh utama jenis pengawet terhadap nilai rata-rata total padatan terlarut. Secara umum, nira tanpa pengawet, nira dengan rimpang *Curcuma longa*, dan nira dengan akar *Pterospermum celebicum* semuanya berada pada kisaran  $\pm 11,7$ – $11,9$  °Brix dengan simpangan baku yang sangat kecil. Perbedaan numerik antar perlakuan kurang dari  $\pm 0,2$  °Brix dan tidak disertai perbedaan notasi huruf, sejalan dengan hasil analisis statistik yang menunjukkan bahwa efek utama jenis pengawet tidak signifikan. Dengan kata lain, pada rentang kondisi yang dikaji, penambahan *C. longa* maupun *P. celebicum* tidak mengubah total padatan terlarut secara rata-rata dibandingkan kontrol. Hal ini karena TPT terutama mencerminkan kandungan gula terlarut nira, sedangkan jumlah pengawet yang ditambahkan relatif kecil dibandingkan volume nira sehingga kontribusi padatan larut dari pengawet (dan pengaruhnya terhadap konsumsi gula oleh mikroorganisme) tidak cukup besar untuk menghasilkan perbedaan °Brix secara statistik.

Gambar 2.5b menyajikan TPT rata-rata pada berbagai konsentrasi pengawet. Nilai °Brix berkisar antara  $\pm 11,6$  hingga  $\pm 11,9$ , dengan sedikit kecenderungan meningkat pada konsentrasi yang lebih tinggi, namun perbedaan absolutnya tetap sangat kecil (kurang dari  $\pm 0,3$  °Brix). Notasi huruf pada grafik menunjukkan bahwa keempat level (0, 5, 10, dan 15 g/L) tidak berbeda nyata satu sama lain, hal ini konsisten dengan hasil uji efek utama konsentrasi yang tidak signifikan ( $p = 0,507$ ). Secara praktis, hal ini mengindikasikan bahwa pada kisaran dosis 5–15 g/L, penambahan pengawet nabati tidak memodifikasi kadar padatan terlarut secara berarti. Dengan demikian, setiap perubahan TPT yang teramati sepanjang penyimpanan lebih tepat dikaitkan dengan proses biokimia nira itu sendiri, bukan dengan variasi konsentrasi pengawet.

Dinamika TPT selama penyimpanan 0–8 jam ditunjukkan pada Gambar 2.6(a–b). Pada semua kombinasi jenis dan konsentrasi pengawet, TPT awal berada pada kisaran  $\pm 12,0$  °Brix. Hingga sekitar jam ke-5–6, nilai °Brix hanya berfluktuasi kecil di sekitar titik awal, dengan perubahan kurang dari  $\pm 0,1$ – $0,2$  °Brix. *Post hoc pairwise comparison dengan koreksi Bonferroni* menunjukkan bahwa perbedaan antara waktu 0, 1, 2, 3, 4, 5, dan 6 jam sebagian besar tidak signifikan ( $p > 0,05$ ), yang mengindikasikan bahwa selama fase ini total padatan terlarut relatif stabil. Perubahan signifikan mulai tampak pada jam ke-7 dan ke-8. Dibandingkan dengan jam ke-0, penurunan TPT pada jam ke-7 dan ke-8 masing-masing sekitar 0,22 dan 0,35 °Brix, dan keduanya berbeda nyata secara statistik ( $p < 0,001$ ). Demikian pula, perbandingan antara 1–6 jam dengan jam ke-8 menunjukkan penurunan yang signifikan pada sebagian besar pasangan waktu. Meskipun nilai penurunannya kecil, pola ini menegaskan bahwa waktu penyimpanan yang lebih panjang secara perlahan menurunkan kadar padatan terlarut.

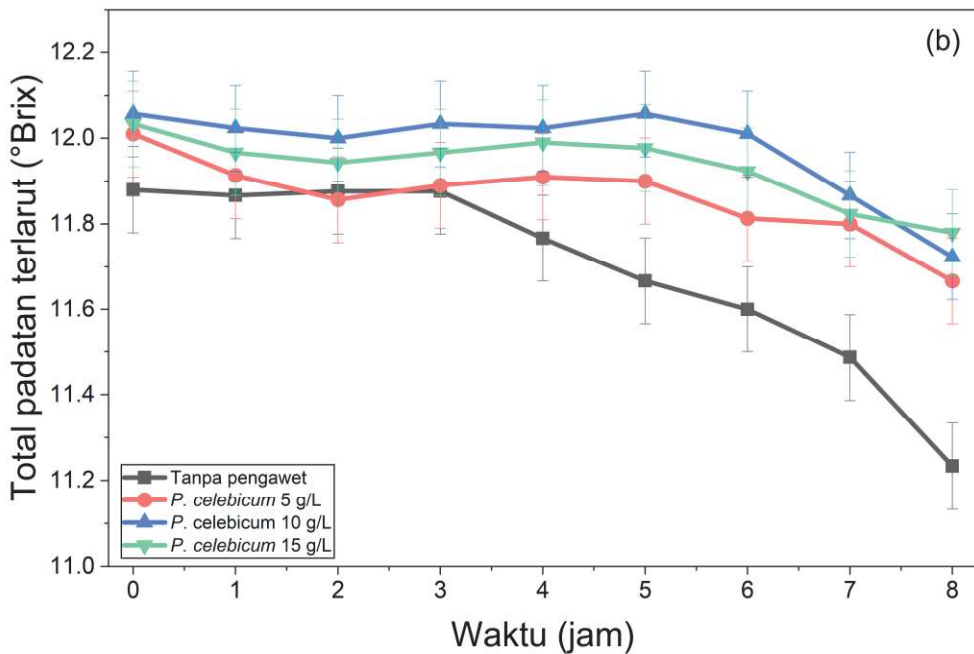
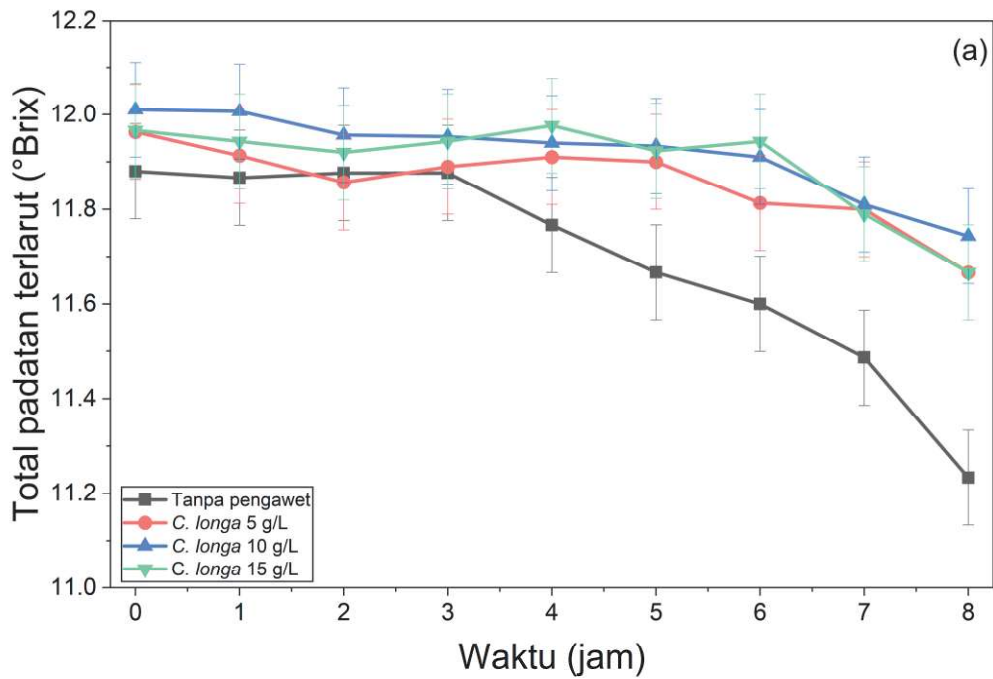


Gambar 2.5. Rata-rata total padatan terlarut nira aren pada berbagai jenis pengawet (a), dan konsentrasi pengawet (b).

Penurunan TPT pada jam-jam akhir penyimpanan dapat dikaitkan dengan aktivitas mikroorganisme yang memanfaatkan gula terlarut sebagai substrat, sehingga total gula yang terukur sebagai °Brix berkurang. Mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae* menghasilkan enzim invertase yang menghidrolisis sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa, yang kemudian difermentasi menjadi etanol dan CO<sub>2</sub>. Pada nira kelapa sawit, Ziadi (Ziadi et al., 2014) melaporkan bahwa jumlah TPT menurun selama penyimpanan, dari 13% menjadi 6% seiring berjalannya waktu. Penurunan ini disebabkan oleh fermentasi spontan yang konversi gula menjadi senyawa lain seperti alkohol dan pembentukan asam akibat aktivitas mikroba. Jumlah penurunan yang relatif kecil (sekitar 0,3–0,4 °Brix dalam 8 jam) menunjukkan bahwa pada rentang waktu penyimpanan yang diamati, proses pemanfaatan gula masih berada pada tahap awal dan belum menyebabkan perubahan drastis pada komposisi padatan terlarut.

Pengukuran TPT pada nira tanaman palma sangat penting dalam mengevaluasi kualitas dan karakteristik nira karena merupakan indikator utama kandungan gula dalam nira palma. TPT secara langsung memengaruhi tingkat kemanisan dan kualitas keseluruhan nira. Nilai TPT yang lebih tinggi umumnya menandakan kandungan gula yang lebih tinggi, yang diinginkan baik untuk konsumsi langsung maupun pengolahan menjadi produk seperti gula palma dan produk turunannya (Gunawan et al., 2020b; Naknean et al., 2010; Ziadi et al., 2014). Selama penyimpanan, kadar TPT dapat berfluktuasi akibat aktivitas mikroba dan perubahan kimia, yang dapat menyebabkan penurunan rasa manis dan potensi kerusakan (Karamoko et al., 2012; Ziadi et al., 2014).

Tidak ditemukannya interaksi signifikan antara jenis pengawet, konsentrasi, dan waktu penyimpanan mengindikasikan bahwa pola penurunan TPT terhadap waktu serupa pada semua kombinasi perlakuan. Artinya, baik nira tanpa pengawet maupun nira dengan berbagai jenis dan konsentrasi pengawet mengalami penurunan °Brix yang relatif kecil dan paralel. Jenis dan konsentrasi pengawet pada penelitian ini tidak mempercepat maupun memperlambat penurunan TPT secara bermakna. Dari sudut pandang pengolahan, hasil ini penting karena menunjukkan bahwa stabilitas total padatan terlarut nira aren pada penyimpanan awal relatif tinggi, sehingga perbedaan utama antar perlakuan lebih tercermin pada parameter lain (seperti pH dan kekeruhan) daripada pada °Brix. Dengan demikian, strategi pengawetan pada tahap awal lebih perlu difokuskan pada pengendalian keasaman dan kejernihan, sementara kadar padatan terlarut masih dapat dipertahankan pada kisaran awal dengan perubahan yang sangat minimal selama 8 jam penyimpanan.



Gambar 2.6. Perubahan rata rata total padatan terlarut nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

## Gula Invert

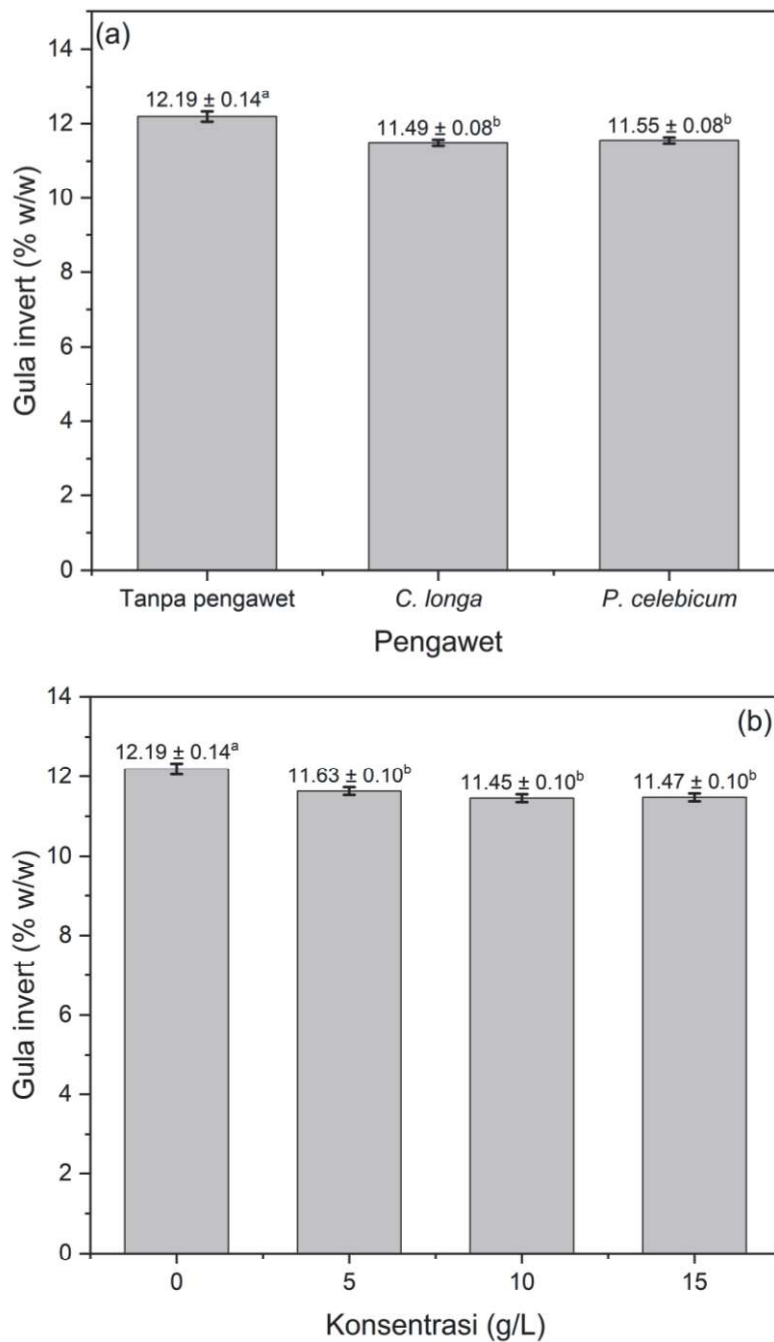
Gula invert merujuk pada campuran glukosa dan fruktosa, yang dihasilkan melalui hidrolisis sukrosa. Proses ini dikatalisis oleh enzim invertase, yang memecah sukrosa menjadi monosakarida penyusunnya (Degenhardt et al., 2023; Manoochehri et al., 2020). Mikroorganisme seperti ragi *Saccharomyces*, bakteri asam laktat dan jamur *Aspergillus* diketahui dapat memproduksi enzim invertase yang dapat mengubah sukrosa menjadi gula invert (Awad et al., 2013; Elsayed & El Enshasy, 2018; Lindsay et al., 2024; Shi et al., 2024; Veana et al., 2014). Nira tanaman palma umumnya mengandung mikroorganisme yang beragam, termasuk bakteri asam laktat (LAB), bakteri asam asetat dan berbagai jenis ragi (Djeni et al., 2020; Gopal et al., 2021; Kouamé et al., 2020; Ouoba et al., 2012; Shi et al., 2024; Zongo et al., 2021).

Hasil *Type III Tests of Fixed Effects* pada *Linear Mixed Method* menunjukkan bahwa hanya waktu penyimpanan yang berpengaruh signifikan terhadap kadar gula invert nira aren ( $p < 0,001$ ). Efek utama jenis pengawet dan konsentrasi pengawet tidak signifikan (masing-masing  $p = 0,616$  dan  $p = 0,393$ ), demikian pula seluruh interaksi di antara ketiga faktor ( $p > 0,05$ ; Tabel 2.1). Hal ini menunjukkan bahwa secara umum perubahan gula invert terutama ditentukan oleh lamanya penyimpanan, sedangkan variasi jenis dan dosis pengawet hanya memberikan kontribusi yang relatif kecil. Meskipun demikian, *post hoc pairwise comparison* dengan koreksi *Bonferroni* menunjukkan adanya perbedaan kecil namun signifikan antara kontrol dan perlakuan yang mengandung pengawet, baik ketika faktor jenis pengawet maupun konsentrasi pengawet dianalisis.

Gambar 2.7a memperlihatkan kadar gula invert rata-rata pada berbagai jenis pengawet. Secara deskriptif, nira tanpa pengawet memiliki gula invert tertinggi, sekitar 12,1% (w/w), sedangkan nira yang diberi rimpang *Curcuma longa* dan akar *Pterospermum celebicum* berada pada kisaran 11,4–11,5% (w/w). Hasil *post hoc pairwise comparison* dengan koreksi *Bonferroni* menunjukkan bahwa kontrol tanpa pengawet berbeda nyata dengan kedua pengawet nabati tersebut: selisih rata-rata antara kontrol dan *C. longa* sekitar 0,70 poin persentase ( $p = 0,002$ ), dan antara kontrol dan *P. celebicum* sekitar 0,65 poin persentase ( $p = 0,004$ ). Sebaliknya, *C. longa* dan *P. celebicum* tidak berbeda signifikan satu sama lain ( $p = 1,000$ ). Dengan demikian, penambahan pengawet nabati cenderung menurunkan kadar gula invert dibandingkan kontrol, tetapi besar efeknya relatif kecil (sekitar 0,6–0,7% w/w) dan ketika seluruh faktor (termasuk waktu) dipertimbangkan dalam model LMM, pengaruh jenis pengawet tercatat tidak kuat secara global ( $p = 0,616$ , Tabel 2.1.)

Gambar 2.7b menyajikan kadar gula invert rata-rata pada berbagai konsentrasi pengawet. Nira tanpa pengawet (0 g/L) kembali menunjukkan nilai tertinggi, sekitar 12,1% (w/w), sedangkan penambahan pengawet 5, 10, dan 15 g/L menurunkan gula invert ke kisaran 11,4–11,6% (w/w). *Post hoc pairwise comparison* dengan koreksi *Bonferroni* menunjukkan bahwa, konsentrasi 0 g/L berbeda nyata dengan 5, 10, dan 15 g/L, dengan selisih rata-rata masing-masing sekitar 0,56; 0,72; dan 0,74 poin persentase ( $p = 0,030$ ; 0,004; 0,005). Di antara konsentrasi yang mengandung pengawet (5, 10, dan 15 g/L), tidak terdapat perbedaan signifikan ( $p = 1,000$  untuk semua pasangan). Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan pengawet pada kisaran  $\geq 5$  g/L cenderung menurunkan gula invert dibandingkan nira tanpa pengawet, tetapi peningkatan dosis dari

5 menjadi 10 atau 15 g/L tidak memberikan penurunan tambahan yang berarti. Selisih hanya sekitar 0,6–0,7% (w/w), sehingga secara praktis efek konsentrasi terhadap gula invert dapat dianggap moderat dan bukan faktor utama perubahan komposisi gula.



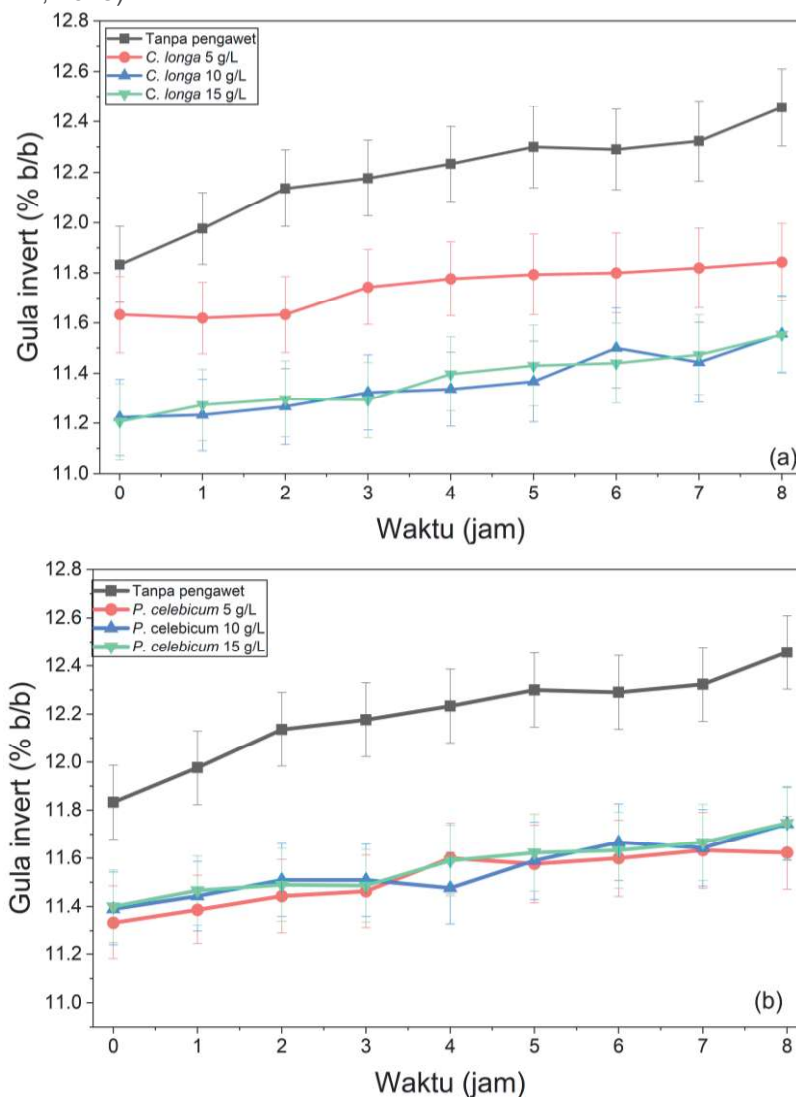
Gambar 2.7. Rata-rata gula invert nira aren pada berbagai jenis pengawet (a), dan konsentrasi pengawet (b).

Perubahan gula invert selama penyimpanan 0–8 jam ditampilkan pada Gambar 2.8(a–b). Pada awal penyimpanan, kadar gula invert seluruh perlakuan berada pada kisaran 11,1–11,3% (w/w). Seiring bertambahnya waktu, terlihat tren kenaikan yang bertahap pada semua kurva. Pada kontrol tanpa pengawet, gula invert meningkat hampir linier hingga mencapai sekitar 12,4–12,5% (w/w) pada jam ke-8; Pada nira dengan *C. longa* maupun *P. celebicum*, kenaikan juga terjadi tetapi dengan kemiringan yang lebih landai; pada jam ke-8 gula invert berada di kisaran 11,6–11,8% (w/w). Hasil *post hoc pairwise comparison dengan koreksi Bonferroni* menunjukkan bahwa perbedaan antara waktu 0 dan 1–2 jam belum signifikan ( $p > 0,05$ ), menandakan fase awal di mana perubahan gula invert masih kecil. Mulai jam ke-3, gula invert mulai berbeda nyata dibandingkan beberapa waktu awal; misalnya selisih antara 0 dan 3 jam sekitar 0,14% (w/w) ( $p = 0,025$ ) dan terus meningkat menjadi sekitar 0,36% (w/w) antara 0 dan 8 jam ( $p < 0,001$ ). Perbandingan antara waktu menengah (4–6 jam) dan akhir (8 jam) juga menunjukkan perbedaan yang signifikan pada sebagian besar pasangan. Secara keseluruhan, waktu penyimpanan menyebabkan kenaikan gula invert sekitar 0,3–0,4 poin persentase dalam 8 jam. Kenaikan ini menggambarkan berlangsungnya hidrolisis sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa oleh enzim yang secara alami terdapat pada nira dan/atau aktivitas enzimatik mikroorganisme. Walaupun perubahannya tidak terlalu besar, perubahan ini konsisten secara statistik dan menjadi indikator awal dimulainya proses fermentasi.

Tidak ditemukannya interaksi signifikan antara jenis pengawet, konsentrasi, dan waktu mengindikasikan bahwa pola kenaikan gula invert terhadap waktu bersifat hampir paralel pada semua kombinasi perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa baik nira tanpa pengawet maupun nira dengan berbagai jenis dan konsentrasi pengawet mengalami tren peningkatan gula invert yang serupa; perbedaan yang muncul antara kontrol dan perlakuan berpengawet hanya berupa pergeseran level rata-rata sekitar 0,6–0,7% (w/w). Dari sisi praktik pengolahan, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan pengawet nabati lebih dominan memengaruhi parameter lain seperti pH dan kekeruhan, sementara pengaruhnya terhadap dinamika gula invert relatif terbatas. Namun demikian, kenaikan gula invert seiring waktu tetap perlu diperhatikan sebagai penanda awal fermentasi, karena pada tahap lanjutan proses ini dapat memengaruhi profil rasa manis, keasaman, dan kestabilan produk nira atau produk turunan yang dihasilkan.

Nira tanaman palma mengandung kadar sukrosa yang bervariasi. Sarkar et al. (2023), melaporkan bahwa kadar sukrosa tanaman palma pada umumnya antara 5,30 hingga 27,00 g/100 ml. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan perbedaan spesies, wilayah pertumbuhan, dan kondisi iklim. Kandungan gula yang dalam nira palma adalah makanan pertumbuhan mikroorganisme seperti bakteri dan ragi. Bakteri *Lactobacillus*, jamur *Aspergillus* dan ragi *Saccharomyces* dapat menghasilkan enzim invertase yang memecah gula kompleks menjadi glukosa dan fruktosa (Carvalho et al., 2019; Veana et al., 2018). Jenis Mikroorganisme seperti ragi *Saccharomyces* dan bakteri *Lactobacillus* telah banyak dilaporkan keberadaannya secara alami pada nira segar. *Saccharomyces cerevisiae* ditemukan sebagai spesies ragi yang paling sering muncul dalam nira tanaman palma, dengan frekuensi kemunculan yang sangat tinggi pada berbagai jenis nira kelapa, palmira dan nipah (Limtong et al., 2020). Studi oleh Adisyahputra &

Handayani (2024), melaporkan bahwa *Saccharomyces cerevisiae* terdapat dalam nira aren dan tanah di sekitar tempat tumbuh tanaman aren (Adisyahputra & Handayani, 2024). Sementara *Lactobacillus* yang ditemukan pada nira aren adalah jenis *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus rhamnosus* (Erliana et al., 2020). Kandungan gula tinggi dalam nira aren dan keberadaan mikroorganisme membentuk suatu sistem biologi aktif, dimana gula berperan sebagai substrat utama pertumbuhan mikroba. *Saccharomyces* dan *Lactobacillus* mengubah gula menjadi gula invert melalui aktivitas enzim invertase ( $\beta$ -D-fructofuranosidase). Invertase menghidrolisis sukrosa menjadi campuran glukosa dan fruktosa (Adedugbe & Ilesanmi, 2023; Gerez et al., 2008; Manoochchetri et al., 2020; Veana et al., 2018).



Gambar 2.8. Perubahan rata rata gula invert nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

Proses hidrolisis sukrosa juga terjadi dengan adanya bakteri asam laktat. Proses ini melibatkan pemutusan ikatan glikosidik antara glukosa dan fruktosa dalam sukrosa, menghasilkan gula invert yang memiliki sifat optik terbalik dari rotasi positif ke negatif (Veana et al., 2018). Pada nira tanaman palem kipas Afrika (*Borassus aethiopum*), jumlah gula invert dilaporkan sebanyak 12.08 g/L dengan distribusi 4.99 g/L glucose dan fuctose 7.09 g/L (Zongo et al., 2020). Sementara Sarkar et al, melaporkan bahwa kandungan glukosa dalam nira tanaman palma berkisar antara 0,49 hingga 86,90 g/100 ml, dan kandungan fruktosa berkisar antara 0,26 hingga 1,61 g/100 ml (Sarkar et al., 2023). Hasil penelitian yang didapatkan pada nira aren menunjukkan bahwa angka berada dalam kisaran laporan gula invert pada tanaman palma.

Keberadaan gula invert pada nira palma bisa menjadi hal yang menguntungkan atau merugikan tergantung pada produk turunan nira aren. Gula invert memiliki rasa manis yang lebih tinggi daripada sukrosa dan lebih tahan terhadap kristalisasi, yang membuatnya sangat diinginkan dalam industri makanan, terutama dalam pembuatan permen dan produk yang memerlukan stabilitas tinggi (Degenhardt et al., 2023). Namun, pada proses pengolahan gula kristal, nira palma dengan pH di bawah 5.0 menunjukkan kadar gula reduksi yang lebih tinggi, yang dapat mempengaruhi proses kristalisasi gula menjadi lebih sulit (Wiboonsirikul et al., 2024). Penggunaan pengawet alami seperti kulit batang manggis pada nira palma dapat mempertahankan kandungan gula dan pH nira, yang menunjukkan bahwa pengawet ini dapat memperlambat penurunan kualitas nira (Lantemona et al., 2023). Penggunaan nisin sebagai pengawet alami juga menunjukkan bahwa aktivitas invertase tidak terpengaruh secara signifikan, meskipun ada penurunan aktivitas enzim polifenol oksidase (Naknean, 2013). Lebih lanjut, studi sebelumnya melaporkan bahwa perlakuan dengan pengawet alami sebelum penyadapan lebih efektif dalam mempertahankan kualitas dan umur simpan nira palma dibandingkan dengan penambahan pengawet setelah penyadapan. Hal ini dapat mengurangi aktivitas mikroba dan fermentasi awal yang dapat mengubah kandungan gula invert (Athirah & Kho, 2024). Temuan temuan ini sejalan dengan hasil penelitian bahwa penambahan pengawet alami seperti kulit manggis atau akar kayu bayur dan kunyit dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme, sehingga memperlambat produksi gula invert dibandingkan nira tanpa penambahan pengawet.

## **Warna**

Warna adalah atribut kualitas pertama yang dinilai oleh konsumen dan sering menjadi faktor utama dalam memilih produk pangan (Pathare et al., 2013). Pengukuran warna sering digunakan sebagai indikator tidak langsung untuk atribut kualitas lainnya seperti rasa dan kandungan pigmen, karena pengukuran warna lebih sederhana, cepat, dan memiliki korelasi yang baik dengan sifat fisikokimia lainnya (Pandiselvam et al., 2023; Pathare et al., 2013). Warna juga dapat digunakan untuk mengontrol kualitas produk selama proses produksi dan penyimpanan. Perubahan warna dapat menunjukkan perubahan dalam komposisi kimia, yang penting untuk memastikan produk tetap dalam kondisi optimal (Pandiselvam et al., 2023).

Pada nira tanaman palma, warna dapat digunakan sebagai indikator kualitas dan kesegaran. Perubahan warna sering kali menunjukkan perubahan dalam komposisi kimia dan mikrobiologis, yang dapat mempengaruhi kualitas produk akhir misalnya gula

palm (Ansar et al., 2022; Naknaen & Meenune, 2015; Wiboonsirikul, 2024a). Pengukuran warna dilakukan dengan sistem CIELAB dengan menggunakan colorimeter. CIELAB (atau CIE  $L^*a^*b^*$ ) adalah sistem warna tiga dimensi yang dikembangkan oleh CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) pada tahun 1976 dengan bertujuan menghasilkan ruang warna yang secara perseptual lebih mendekati persepsi manusia, dimana perbedaan numerik berbanding lurus dengan perbedaan visual (Briggs, 2023). Komponen utama dalam sistem CIELAB adalah pengukuran  $L^*$ ,  $a^*$ , dan  $b^*$ . Nilai  $L^*$  merepresentasikan kecerahan dari hitam (0) ke putih (100),  $a^*$  mewakili spektrum hijau-merah, sumbu hijau (-) ke merah (+), sedangkan  $b^*$  merepresentasikan spektrum biru-kuning, sumbu biru (-) ke kuning (+). Berdasarkan nilai  $L^*$ ,  $a^*$ , dan  $b^*$ , nilai total perubahan warna ( $\Delta E^*$ ) yang terjadi secara visual dapat ditentukan (Bielaszka et al., 2024; Briggs, 2023; Pathare et al., 2013). Selain itu, parameter  $L$ ,  $a$ , dan  $b^*$  juga dapat diringkas menjadi suatu indeks pencoklatan (Browning Index/BI) untuk memberikan ukuran terpadu derajat pencoklatan berbasis koordinat warna. BI bersifat tanpa satuan (dimensionless) dan umumnya meningkat ketika warna bergeser ke arah cokelat (ditandai oleh penurunan  $L^*$  disertai peningkatan komponen kemerahan dan kekuningan), sedangkan nilai BI yang rendah atau negatif mengindikasikan sampel masih berada di luar "zona cokelat" pada ruang warna

Berdasarkan ringkasan *Type III Tests of Fixed Effects* (Tabel 2.2), waktu penyimpanan memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap seluruh parameter warna ( $L^*$ ,  $a^*$ , dan  $b^*$ ;  $p \leq 0,003$ ). Jenis pengawet berpengaruh signifikan terhadap  $L^*$  ( $p < 0,001$ ), tetapi tidak terhadap  $a^*$  dan hanya mendekati signifikan terhadap  $b^*$  ( $p = 0,081$ ). Konsentrasi pengawet tidak berpengaruh nyata terhadap  $L^*$  dan  $a^*$ , namun berpengaruh signifikan terhadap  $b^*$  ( $p = 0,026$ ). Seluruh interaksi yang melibatkan waktu, (waktu x pengawet, waktu x konsentrasi, maupun waktu x pengawet x konsentrasi) tidak signifikan untuk ketiga parameter warna ( $p > 0,05$ ). Artinya, perubahan warna terutama ditentukan oleh lamanya penyimpanan, sedangkan jenis dan konsentrasi lebih berperan sebagai pergeseran rata-rata yang relatif konsisten sepanjang waktu.

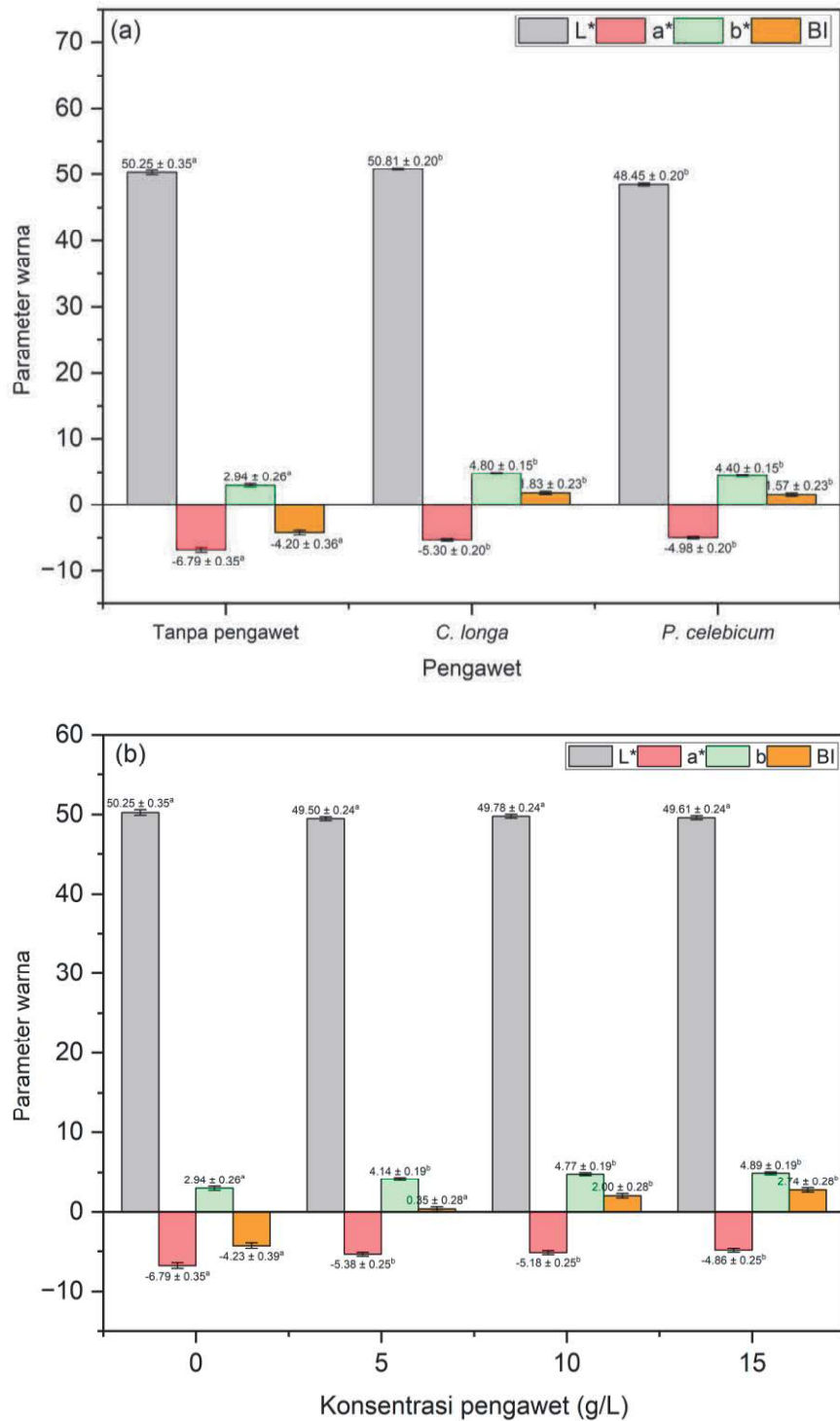
Gambar 2.9a menunjukkan bahwa penambahan pengawet nabati mengubah profil warna nira aren dibandingkan kontrol tanpa pengawet. Secara umum, kontrol tanpa pengawet memiliki  $L^*$  sekitar 50; penambahan *Curcuma longa* sedikit meningkatkan  $L^*$  (nira tampak sedikit lebih cerah); penambahan *Pterospermum celebicum* sedikit menurunkan  $L^*$  (nira tampak agak lebih gelap). Notasi huruf pada grafik (kontrol berbeda dengan kelompok pengawet, sedangkan *C. longa* dan *P. celebicum* tidak saling berbeda) konsisten dengan efek utama jenis pengawet yang signifikan pada  $L^*$ . Secara praktis, hal ini menunjukkan bahwa penggunaan pengawet nabati tidak hanya memengaruhi stabilitas kimia, tetapi juga memberikan pergeseran kecerahan yang halus, dengan kunyit cenderung mempertahankan atau sedikit meningkatkan kecerahan dan kayu bayur sedikit menurunkannya.

Nilai  $a^*$  awal berada pada kisaran negatif, yang menggambarkan dominasi nuansa hijau–kekuningan khas nira segar. Rata-rata nira tanpa pengawet memiliki nilai  $a^*$  paling negatif (menuju arah hijau); nira dengan *C. longa* dan *P. celebicum* memiliki nilai  $a^*$  yang kurang negatif, artinya warna bergeser sedikit ke arah merah/kecokelatan. Secara deskriptif, *P. celebicum* cenderung menghasilkan  $a^*$  yang lebih tinggi (lebih mendekati nol) dibanding *C. longa* dan kontrol, sejalan dengan kesan warna sedikit

kemerahan yang secara alami dari kayu bayur. Namun, efek utama jenis pengawet terhadap  $a^*$  tidak signifikan pada taraf 5%. Sehingga perbedaan ini lebih merupakan kecenderungan halus yang konsisten dengan sifat pigmen, bukan sebagai perubahan warna yang besar secara statistik.

Nilai  $b^*$  menggambarkan komponen kuning pada warna nira. Rata-rata nira tanpa pengawet memiliki  $b^*$  paling rendah (sekitar  $\approx 3$ , yang berarti kuningnya relatif lemah dan kurang intens); *C. longa* menaikkan  $b^*$  menjadi sekitar  $\approx 5$  (nira tampak lebih kuning); *P. celebicum* juga meningkatkan  $b^*$ , meskipun sedikit lebih rendah dibanding kunyit. Secara deskriptif, kedua pengawet menaikkan komponen kuning nira, dan pola ini sangat sesuai secara biologis dengan keberadaan pigmen kurkuminoid kuning pada kunyit dan senyawa fenolik berwarna kekuningan–kecokelatan pada kayu bayur. Efek utama jenis pengawet terhadap  $b^*$  berada di sekitar batas signifikansi (mendekati  $p = 0,05$ ), sehingga dapat dikatakan terdapat kecenderungan kuat bahwa nira dengan pengawet tampak lebih kuning daripada kontrol. Secara keseluruhan, jenis pengawet membuat nira sedikit lebih cerah atau lebih gelap ( $L^*$ ), menggeser warna perlahan ke arah lebih merah (terutama pada *P. celebicum*), dan secara konsisten meningkatkan komponen kuning ( $b^*$ ), terutama pada *C. longa*, sesuai karakteristik pigmen alami kedua bahan tersebut.

Jika ditinjau menggunakan BI pada Gambar 2.9(a), kontrol tanpa pengawet memiliki nilai BI negatif ( $-4,20 \pm 0,36$ ), sedangkan penambahan pengawet nabati menghasilkan BI positif, yaitu  $1,83 \pm 0,23$  pada *C. longa* dan  $1,57 \pm 0,23$  pada *P. celebicum*. Perbedaan notasi huruf menunjukkan bahwa BI kontrol berbeda nyata dibandingkan kedua perlakuan pengawet, sementara BI pada *C. longa* dan *P. celebicum* tidak berbeda satu sama lain. Secara interpretatif, BI negatif pada kontrol mengindikasikan warna nira masih berada di luar zona pencoklatan (belum mengarah ke coklat), sedangkan BI positif pada perlakuan pengawet menunjukkan terjadinya pergeseran warna ke arah lebih “cokelat/kuning-kecokelatan”. Temuan ini memperkuat hasil deskriptif pada  $b$  (komponen kuning) dan  $a$  (lebih mendekati nol), bahwa penambahan bahan nabati membawa kontribusi pigmen/komponen berwarna sehingga indeks pencoklatan meningkat meskipun perubahan  $L^*$  relatif kecil.



Gambar 2.9. Rata-rata nilai parameter warna L\*, a\*, b\* dan *browning indeks* (BI) pada berbagai jenis pengawet (a), dan konsentrasi pengawet (b).

Gambar 2.9b menggambarkan nilai rata-rata  $L^*$ ,  $a^*$ , dan  $b^*$  pada konsentrasi 0, 5, 10, dan 15 g/L (dengan 0 g/L sebagai kontrol tanpa pengawet). Perubahan  $L^*$  antar konsentrasi (0, 5, 10, dan 15 g/L) relatif kecil. Dengan kecenderungan nira tanpa pengawet sedikit lebih cerah dibandingkan konsentrasi berpengawet, sementara konsentrasi 5–15 g/L menghasilkan  $L^*$  yang saling berdekatan. Efek utama konsentrasi terhadap  $L^*$  tidak signifikan, sehingga peningkatan dosis pengawet dalam rentang 5–15 g/L tidak memberikan perbedaan kecerahan yang nyata. Nilai  $a^*$  menunjukkan pola yang mirip: konsentrasi yang lebih tinggi cenderung menggeser warna sedikit ke arah merah ( $a^*$  kurang negatif), namun perbedaan antar konsentrasi kecil dan efek utama konsentrasi terhadap  $a^*$  tidak signifikan. Dengan kata lain, hubungan dosis–respon yang ideal “semakin banyak, semakin merah” tidak muncul secara kuat dan teratur di data, melainkan hanya sebagai pergeseran kecil yang konsisten dengan adanya pigmen pada bahan pengawet.

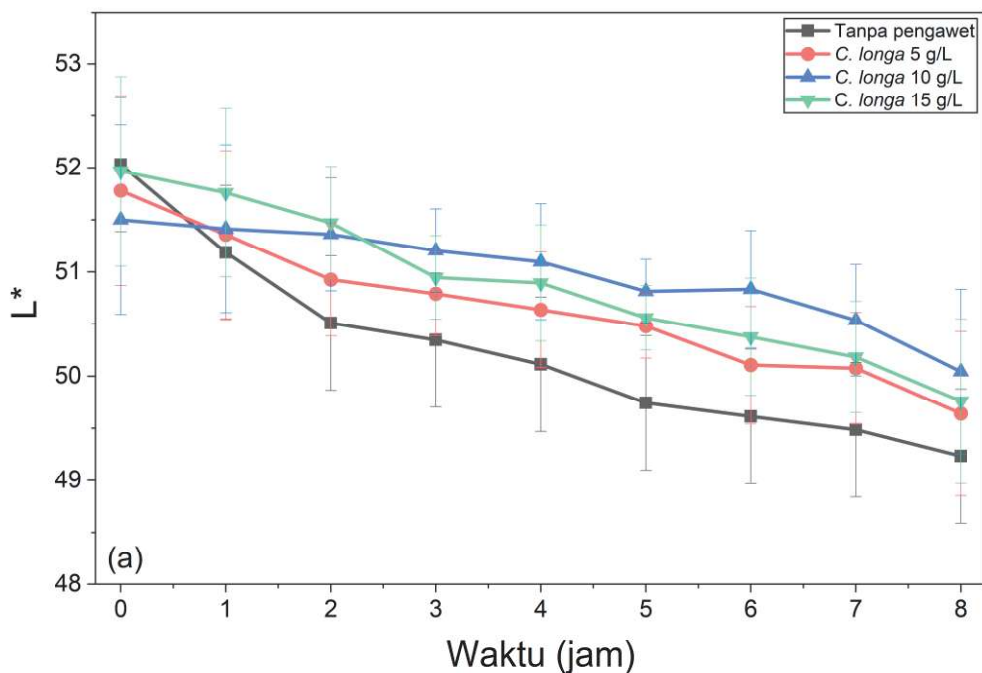
Berbeda dengan  $L^*$  dan  $a^*$ , konsentrasi pengawet berpengaruh signifikan terhadap  $b^*$ . Nira tanpa pengawet menghasilkan  $b^*$  terendah (nira paling kurang kuning), sementara penambahan pengawet 5–15 g/L menaikkan  $b^*$  ke tingkat yang lebih tinggi dan relatif serupa. Hasil uji *Post hoc* dengan koreksi Bonferroni menunjukkan bahwa kontrol 0 g/L berbeda nyata dengan kelompok berpengawet, sedangkan perbedaan antara 5, 10, dan 15 g/L tidak selalu signifikan. Secara umum, hal ini berarti ada perubahan warna ketika beralih dari “tanpa pengawet” ke “ada pengawet” (nira menjadi lebih kuning), tetapi kenaikan dosis dari 5 ke 10 atau 15 g/L tidak lagi meningkatkan kekuningan secara proporsional. Hal ini selaras dengan ekspektasi bahwa penambahan kunyit dan kayu bayur membawa pigmen kuning dan merah kecokelatan ke dalam sistem, namun setelah mencapai kisaran konsentrasi tertentu, tambahan pigmen tidak banyak mengubah persepsi warna.

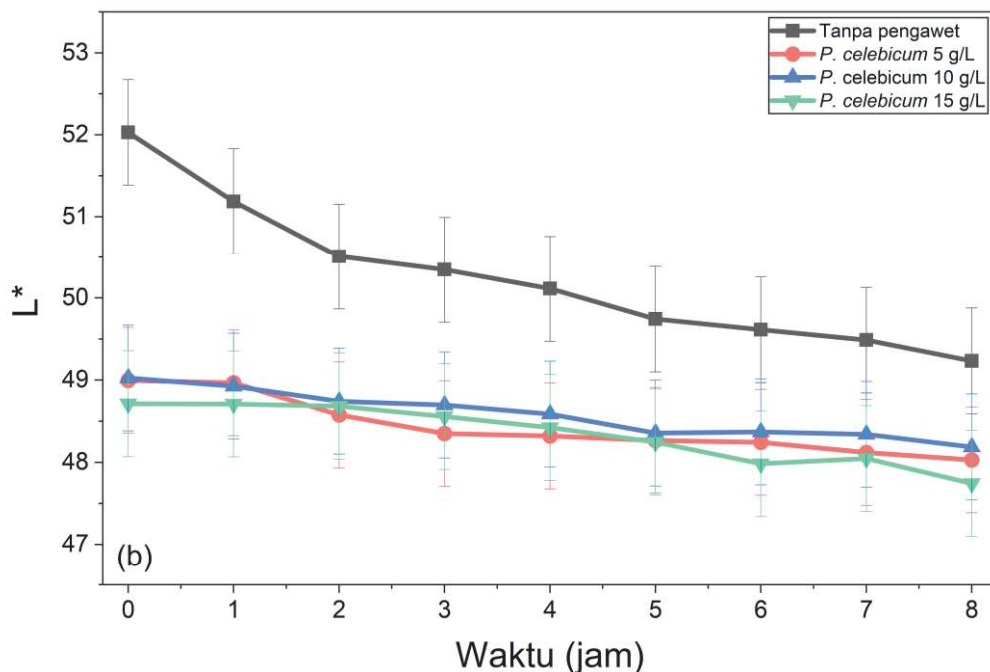
Nilai indeks pencoklatan (Browning indeks/BI) pada Gambar 2.10(b) memperjelas pola “ambang” terhadap konsentrasi. Kontrol 0 g/L memiliki BI negatif ( $-4,23 \pm 0,39$ ), sedangkan pada 5 g/L BI menjadi positif namun masih rendah ( $0,85 \pm 0,28$ ). Peningkatan BI yang lebih nyata terjadi pada konsentrasi 10–15 g/L, masing-masing sebesar  $2,00 \pm 0,28$  dan  $2,74 \pm 0,28$ . Notasi huruf menunjukkan bahwa kelompok 0 dan 5 g/L berada pada kelompok yang sama (tidak berbeda nyata), sedangkan 10 dan 15 g/L membentuk kelompok berbeda dengan BI lebih tinggi. Artinya, secara praktis peningkatan indeks pencoklatan baru menjadi jelas ketika konsentrasi pengawet mencapai  $\geq 10$  g/L. Pola ini konsisten dengan temuan bahwa konsentrasi berpengaruh signifikan terhadap  $b$  (komponen kuning), sehingga BI, sebagai indeks gabungan, menangkap penguatan warna kuning-kecokelatan terutama pada dosis menengah hingga tinggi, sementara perubahan  $L$  dan  $a^*$  relatif kecil.

Interaksi dua maupun tiga arah terhadap waktu tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa dinamika warna terhadap waktu dapat dianggap sebagai pola umum yang serupa untuk semua kombinasi pengawet dan konsentrasi. Pola hubungan antara  $L^*$ ,  $a^*$  dan  $b^*$  terhadap waktu di sajikan pada gambar 2.11-2.13.

Pada perubahan nilai  $L^*$  (2.10), nilai  $L^*$  nira relatif stabil pada 0–5 jam, kemudian menurun secara bertahap pada jam ke-6 hingga ke-8. Hasil *post hoc pairwise comparison dengan koreksi Bonferroni* menunjukkan bahwa perbedaan  $L^*$  antara jam ke-0 dan jam ke-1 sampai jam ke-6 belum signifikan, sedangkan penurunan  $L^*$  baru

terbukti signifikan pada perbandingan 0 vs 7 jam, 0 vs 8 jam, dan 1 vs 8 jam. Hal ini mengindikasikan bahwa penggelapan nira secara statistik baru bermakna pada fase akhir penyimpanan. Secara deskriptif, pola tersebut konsisten pada semua jenis pengawet, tetapi dengan karakteristik awal yang sedikit berbeda. Nira tanpa pengawet memulai penyimpanan dengan  $L^*$  yang relatif tinggi dan menunjukkan penurunan yang paling jelas menuju jam ke-8. Pada nira dengan *Curcuma longa* (Gambar 2.10a), kurva  $L^*$  berada sedikit lebih tinggi sepanjang waktu, mengindikasikan kecerahan yang relatif lebih terjaga. Sebaliknya, nira dengan *Pterospermum celebicum* (Gambar 2.10b) cenderung memiliki  $L^*$  sedikit lebih rendah sejak awal, sehingga terlihat sedikit lebih gelap, meskipun laju penurunannya terhadap waktu serupa dengan dua perlakuan lainnya. Dengan demikian, jenis pengawet terutama membedakan tingkat kecerahan awal, sementara dinamika penurunan kecerahan didominasi oleh lamanya penyimpanan.

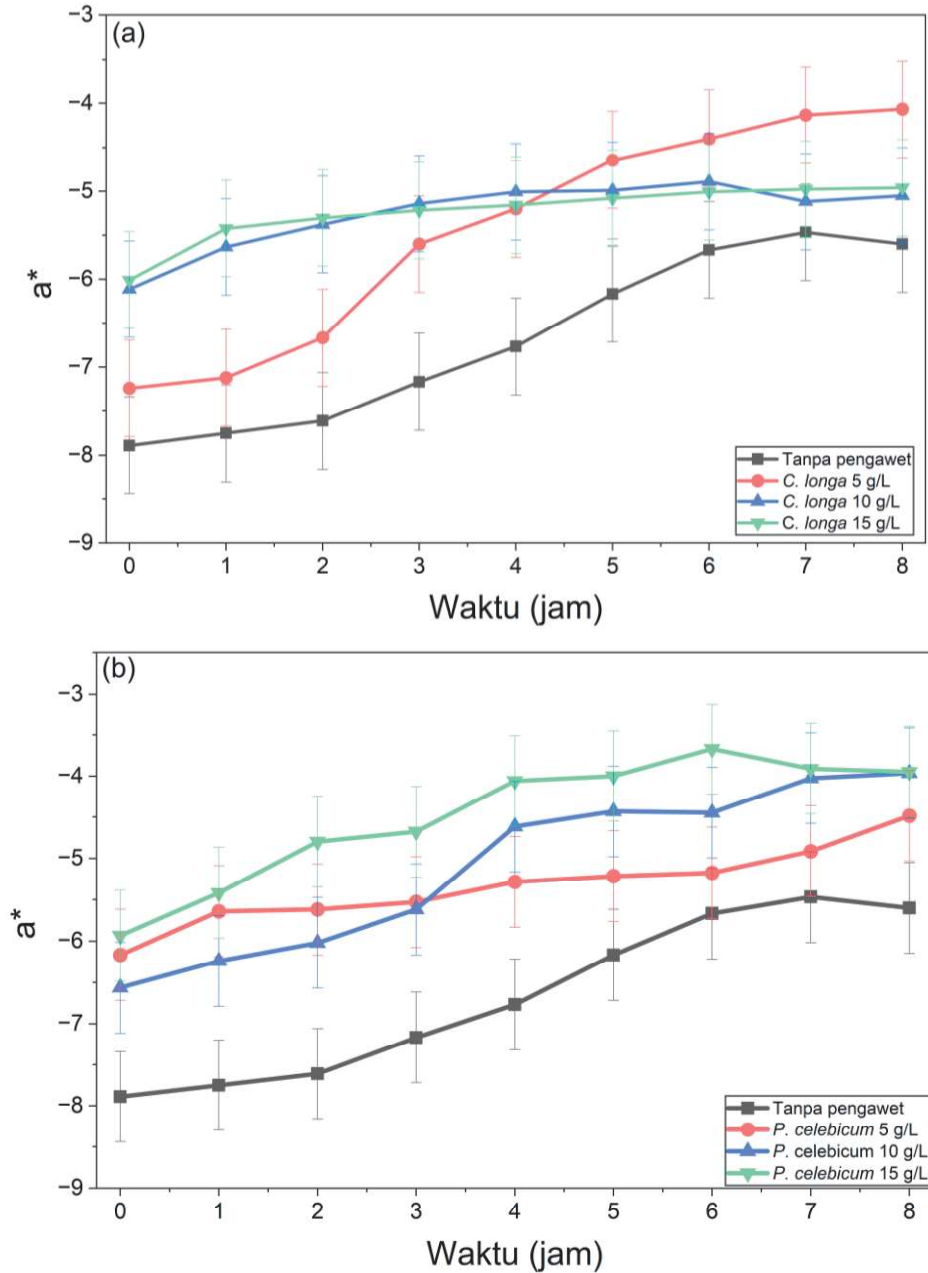




Gambar 2.10. Perubahan rata rata nilai warna  $L^*$  nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

Perubahan nilai rata rata  $a^*$  disajikan pada gambar 2.11. Nilai  $a^*$  awal nira berada pada kisaran negatif, yang mencerminkan rona hijau–kekuningan khas nira segar. Seiring waktu, nilai  $a^*$  meningkat (menjadi kurang negatif), sehingga warna bergeser perlahan ke arah merah kecokelatan. Dari gambar 2.11 terlihat bahwa semua perlakuan menunjukkan perubahan nilai ke arah nol, yang menunjukkan pergeseran ke arah lebih merah. Hasil post hoc pairwise comparison dengan koreksi Bonferroni menunjukkan bahwa perbedaan  $a^*$  antara 0 dan 1–2 jam belum signifikan. Mulai jam ke-3, perbandingan 0 vs 3 jam sudah signifikan ( $\Delta a^* \approx 1$  satuan,  $p = 0,003$ ), dan kenaikan  $a^*$  terus berlanjut hingga jam ke-8, dengan selisih sekitar 1,9–2,0 satuan dibanding jam ke-0 ( $p < 0,001$  untuk 0 vs 4–8 jam). Hal ini menunjukkan bahwa pergeseran warna dari hijau–kekuningan ke arah merah kecokelatan mulai jelas secara statistik pada fase menengah penyimpanan ( $\geq 3$  jam), dan menguat hingga akhir penyimpanan. Secara deskriptif, pola ini konsisten pada semua jenis pengawet, tetapi levelnya sedikit berbeda. Tanpa pengawet;  $a^*$  paling negatif sepanjang waktu (warna paling “hijau”), dengan kenaikan  $a^*$  yang tajam menuju jam ke-8; pada *C. longa* (2.11a) nilai  $a^*$  sedikit lebih tinggi daripada kontrol (kurang hijau), mengindikasikan kontribusi pigmen kuning–oranye kunyit yang menggeser warna mendekati merah kecokelatan, meskipun selisihnya relatif kecil. Nira dengan *P. celebicum* (2.11b), nilai  $a^*$  rata-rata cenderung paling tinggi (paling mendekati nol), sehingga nira tampak sedikit lebih kemerahan dibanding dua perlakuan

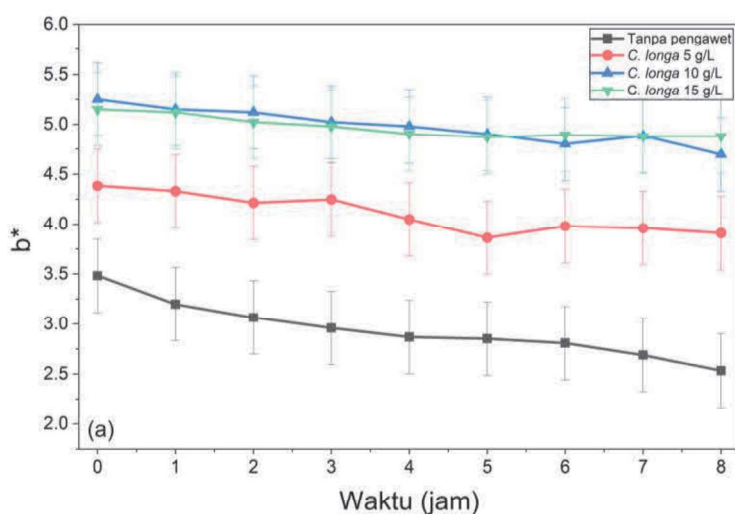
lain. Walaupun efek utama jenis dan konsentrasi pengawet terhadap  $a^*$  tidak selalu signifikan, pola ini menunjukkan kecenderungan yang konsisten: semua perlakuan mengalami pergeseran  $a^*$  seiring waktu, dan nira dengan *P. celebicum* secara deskriptif menempati posisi paling merah, diikuti *C. longa*, sedangkan kontrol tetap paling mendekati hijau.

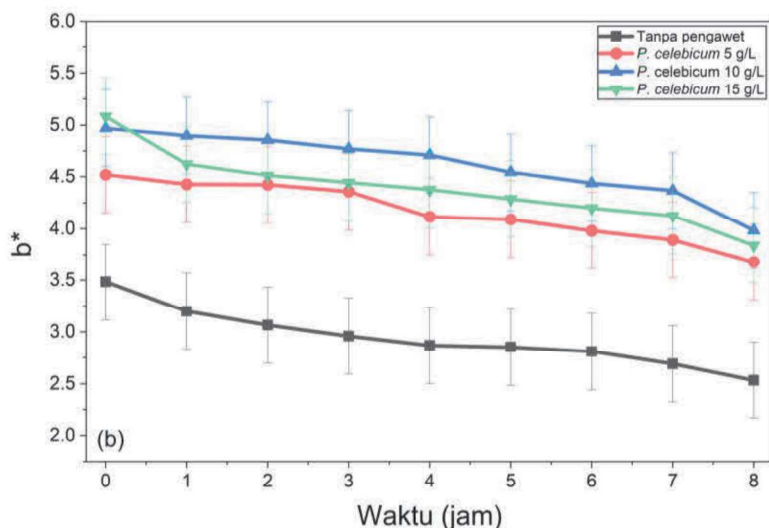


Gambar 2.11. Perubahan rata rata nilai warna  $a^*$  nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

Perubahan rata rata nilai  $b^*$  disajikan pada gambar 2.12. Dari gambar terlihat bahwa semua perlakuan menunjukkan perubahan nilai ke arah nol, yang menunjukkan pergeseran ke arah lebih merah. Pada awal penyimpanan, nilai  $b^*$  berada pada kisaran positif (sekitar 3–5), yang menunjukkan dominasi rona kuning pada nira aren. Secara umum,  $b^*$  relatif stabil pada jam-jam awal, kemudian menurun bertahap pada fase menengah hingga akhir penyimpanan. Hasil *post hoc pairwise comparison* dengan koreksi *Bonferroni* menunjukkan bahwa perbedaan  $b^*$  antara 0 dan 1–3 jam belum signifikan. Penurunan  $b^*$  mulai signifikan pada perbandingan 0 vs 4 jam ( $p \approx 0,044$ ). Pada jam ke-5 hingga ke-8, selisih antara 0 vs 5–8 jam semakin besar dan signifikan ( $p \leq 0,002$ ), dengan penurunan kumulatif sekitar 0,6–0,9. Temuan ini mengindikasikan bahwa komponen kuning nira masih relatif terjaga hingga sekitar 3 jam, kemudian mengalami penurunan nyata mulai jam ke-4 dan seterusnya, sehingga warna menjadi kurang kuning dan tampak lebih pudar.

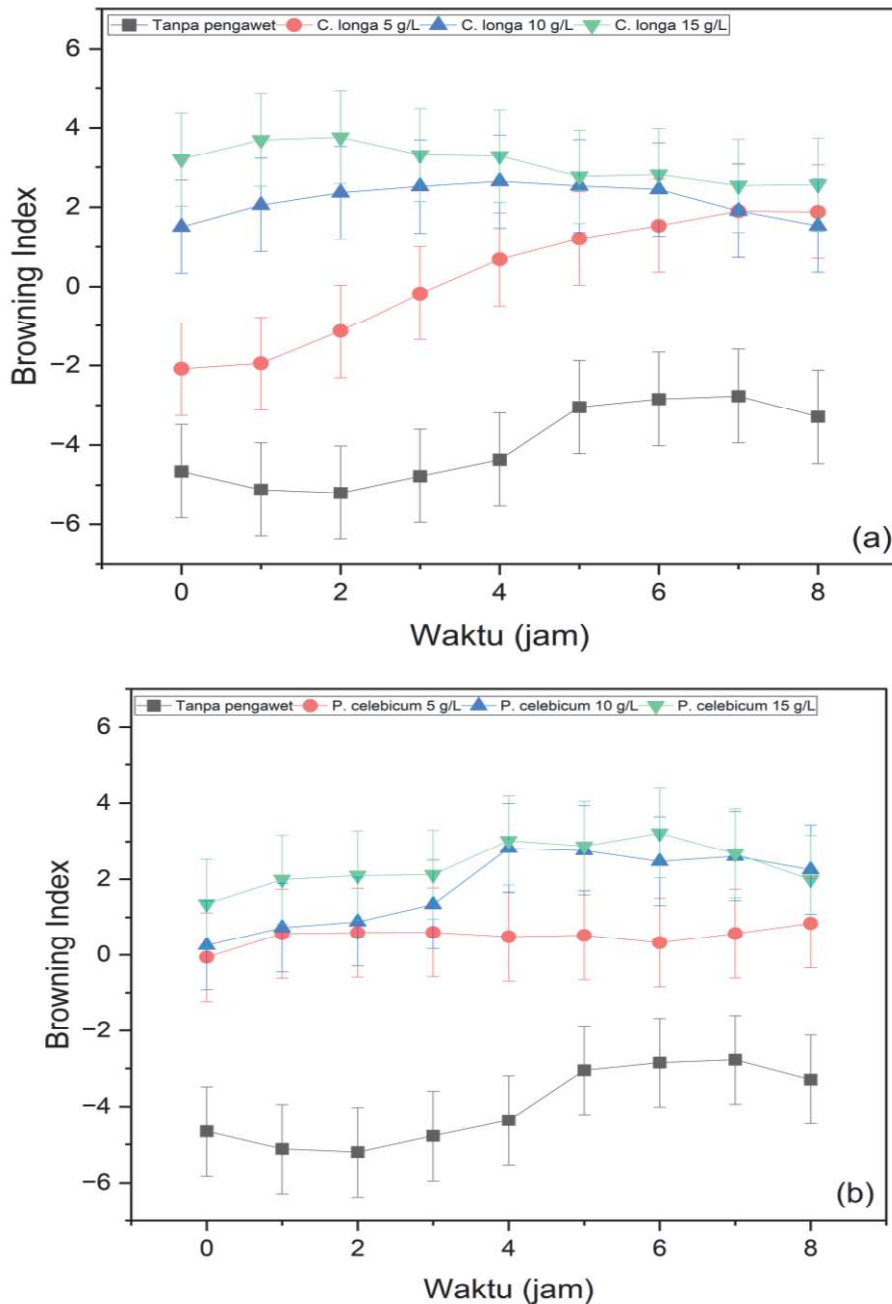
Jika dilihat menurut jenis pengawet, pola umum penurunan  $b^*$  serupa, tetapi tingkat kekuningannya berbeda. Nira tanpa pengawet:  $b^*$  awal relatif rendah dan mengalami penurunan paling jelas, sehingga pada jam ke-8 warna nira tampak paling “pudar” (kurang kuning) dibanding perlakuan lain. Nira dengan *Curcuma longa* (Gambar 2.12a): nira sejak awal sudah memiliki  $b^*$  lebih tinggi (lebih kuning) dan penurunannya lebih landai; hingga jam ke-8, nilai  $b^*$  tetap berada pada kisaran yang lebih tinggi dibanding kontrol. Hal ini konsisten dengan keberadaan pigmen kurkuminoid berwarna kuning pada kunyit yang memberikan dasar warna kuning lebih kuat. Sementara nira dengan *P. celebicum* (Gambar 2.12b), nilai  $b^*$  juga lebih tinggi daripada kontrol dan umumnya sedikit di bawah *C. longa*, mencerminkan kontribusi senyawa berwarna kekuningan–kecokelatan. Penurunan  $b^*$  terhadap waktu tetap terjadi, tetapi nira dengan *P. celebicum* pada akhir penyimpanan masih tampak lebih kuning dibanding kontrol. Secara integratif, kombinasi penurunan  $L^*$  dan  $b^*$  serta peningkatan  $a^*$  menggambarkan transisi warna nira dari kuning kehijauan yang terang menuju cokelat kekuningan yang lebih gelap seiring waktu, dengan pengawet nabati berperan menjaga kecerahan dan nuansa kuning agar tidak turun terlalu cepat.





Gambar 2.12. Perubahan rata rata nilai warna  $L^*$  nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

Gambar 2.13 (a dan b) menunjukkan bahwa nilai Browning Index (BI) nira aren selama penyimpanan meningkat pada perlakuan dengan pengawet nabati dan cenderung lebih tinggi pada konsentrasi yang lebih besar, sedangkan kontrol tanpa pengawet mempertahankan BI negatif sepanjang 0–8 jam, yang menandakan warna nira masih berada di luar zona pencoklatan dan tidak mengalami browning yang nyata. Pada *Curcuma longa* (2.13a), BI meningkat paling jelas seiring waktu, terutama pada 10–15 g/L yang sudah bernilai positif sejak awal dan relatif stabil setelah fase awal penyimpanan, sementara 5 g/L naik bertahap dari nilai negatif menuju positif. Pada *Pterospermum celebicum* (2.13b), BI pada 5 g/L umumnya berada di sekitar nol (pencoklatan sangat ringan), sedangkan 10–15 g/L meningkat hingga mencapai puncak sekitar jam ke-4–6 lalu cenderung stabil atau sedikit menurun. Secara keseluruhan, peningkatan nilai BI pada perlakuan pengawet nabati terutama terjadi pada fase awal penyimpanan dan kemudian cenderung stabil. Dalam konteks penelitian ini, BI lebih mencerminkan kontribusi pigmen dan pergeseran koordinat warna (peningkatan  $b^*$  dan  $a^*$  yang kurang negatif) daripada penggelapan ekstrem akibat penurunan  $L^*$ . Dengan demikian, BI berfungsi sebagai indeks ringkas yang memperkuat interpretasi perubahan warna nira aren selama penyimpanan, sekaligus menegaskan peran jenis dan konsentrasi pengawet nabati dalam mengarahkan kecenderungan warna ke arah kuning–kecokelatan.



Gambar 2.13. Perubahan rata rata indeks pencoklatan (browning indeks) nira aren dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

Perubahan total warna dihitung sebagai  $\Delta E$  terhadap kondisi awal (jam ke-0) untuk setiap kombinasi perlakuan (Tabel 2.4). Pada jam ke-0, seluruh perlakuan memiliki  $\Delta E = 0$ . Selama penyimpanan,  $\Delta E$  meningkat secara bertahap. Pada kontrol tanpa pengawet,  $\Delta E$  naik dari 0 menjadi 0,9 pada jam ke-2, 1,6 pada jam ke-3, dan mencapai

3,4–3,6 pada jam ke-7–8. Pada nira dengan *C. longa*,  $\Delta E$  umumnya lebih rendah: nilai akhir berkisar 2,3–2,9 pada jam ke-8, dengan kenaikan yang lebih lambat terutama pada konsentrasi 10 g/L ( $\Delta E \approx 2,3$ ). Pada nira dengan *P. celebicum*,  $\Delta E$  juga meningkat tetapi tetap berada di kisaran 2,2–2,7 pada jam ke-8, sedikit lebih rendah daripada kontrol dan sebanding dengan kelompok *C. longa*. Secara praktis,  $\Delta E < 1$  pada jam 1–2 menunjukkan bahwa perubahan warna masih sangat halus dan kemungkinan belum menonjol secara visual. Mulai jam ke-3–4,  $\Delta E$  beranjak ke kisaran 1,5–2,0, menandakan perbedaan warna yang mulai terlihat. Pada akhir penyimpanan, kontrol mencapai  $\Delta E > 3$ , yang mengindikasikan perubahan warna yang jelas, sedangkan nira dengan pengawet tetap berada pada  $\Delta E$  sekitar 2–3. Hal ini konsisten dengan temuan bahwa pengawet nabati mampu memperlambat penggelapan dan pergeseran warna total, meskipun tidak dapat sepenuhnya mencegah perubahan warna akibat proses fermentasi dan reaksi kimia selama penyimpanan.

Tabel 2.4. Perubahan nilai total warna dihitung ( $\Delta E^*$ ) selama penyimpanan.

Lama penyimpanan (jam)	Tanpa pengawet	<i>C. longa</i>			<i>P. celebicum</i>		
		5 g/L	10 g/L	15 g/L	5 g/L	10 g/L	15 g/L
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	1.1	0.4	0.6	0.3	0.4	0.9
2	0.9	1.2	0.7	1.1	0.8	0.7	1.2
3	1.6	1.5	1.0	1.5	1.5	1.0	1.3
4	1.9	2.0	1.6	1.8	1.5	1.6	1.7
5	2.3	2.2	1.8	2.0	2.1	1.8	1.8
6	2.5	2.2	1.9	2.3	2.1	1.9	2.1
7	3.4	2.6	2.1	2.4	2.4	2.0	2.0
8	3.6	2.9	2.3	2.7	2.7	2.2	2.3

Perubahan nilai kecerahan ( $L^*$ ), spektrum merah-hijau ( $a^*$ ), dan spektrum biru-kuning ( $b^*$ ) pada nira aren segar sejalan dengan hasil studi sebelumnya yang dilakukan oleh Victor (Victor et al., 2023). Victor melaporkan bahwa pada nira segar tanpa perlakuan pengawet, selama 12 jam setelah penyadapan, nilai  $L^*$  menurun drastis dari kecenderungan berwarna cerah transparan menuju keputihan yang lebih gelap. Nilai  $a^*$  naik dari negatif bergerak ke arah nol seiring waktu fermentasi, menunjukkan perubahan dari arah hijau ke kemerahan sementara nilai  $b^*$  Nilai  $b^*$  cenderung meningkat, menunjukkan pergeseran warna ke arah kekuningan saat fermentasi terjadi (Victor et al., 2023). Pola penurunan nilai yang sama juga ditemukan pada nira lontar, dimana semakin rendah nilai pH nilai  $L$  juga semakin turun (Wiboonsirikul, 2024). Ansar et al. (2022), juga melaporkan bahwa seiring penyimpanan, terjadi perubahan warna nira aren dari bening ke kecoklatan yang mengindikasikan terjadi perubahan nilai  $L$ . Perubahan tingkat nilai  $L^*$ ,  $a^*$ , dan  $b^*$  diinterpretasikan sebagai akibat aktifitas mikroorganisme dalam proses fermentasi awal, yang memiliki korelasi kuat dengan perubahan pH selama penyimpanan (Victor et al., 2023).

Ketika parameter  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , dan  $\Delta E$  dipertimbangkan secara bersama-sama, dapat dikatakan bahwa warna nira tanpa pengawet bergerak dari kondisi awal yang relatif cerah dan kekuningan menuju warna yang sedikit lebih gelap, kurang kuning, dan lebih kecokelatan pada akhir penyimpanan, dengan perubahan total warna yang jelas terlihat ( $\Delta E > 3$ ). Sebaliknya, penambahan *C. longa* dan *P. celebicum* menggeser warna awal nira ke arah kuning–kemerahan yang lebih intens, namun sekaligus cenderung membatasi besarnya perubahan warna lanjutan selama penyimpanan, sehingga  $\Delta E$  akhir tetap berada di bawah atau sekitar ambang perbedaan yang sangat mencolok. Secara kualitatif, *C. longa* lebih dominan meningkatkan komponen kekuningan ( $b^*$ ), sedangkan *P. celebicum* berkontribusi sedikit lebih besar pada kenaikan  $a^*$ , sehingga menghasilkan nuansa kuning kecokelatan yang agak lebih kemerahan. Temuan ini menunjukkan bahwa jenis dan konsentrasi pengawet nabati tidak hanya memengaruhi stabilitas kimia nira, tetapi juga mengarahkan profil warna produk selama penyimpanan jangka pendek, yang berpotensi relevan bagi pertimbangan pengembangan produk lanjutan.

### 2.3.2. Perubahan Senyawa bioaktif

Analisis terhadap nilai senyawa biokimia nira aren dilakukan menggunakan Linear Mixed Model (LMM) untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan preservasi, konsentrasi bahan tambahan, dan waktu penyimpanan terhadap beberapa parameter kimia, yaitu total fenolik, vitamin C, antosianin, kurkumin, dan aktivitas antioksidan. Tabel 2.5 menyajikan ringkasan hasil ANOVA dari masing-masing faktor utama dan interaksinya.

Tabel 2.5. Ringkasan hasil analisis varians terhadap senyawa bioaktif nira aren

Sumber Variasi	Fenolik	Vitamin C	Antosianin	Kurkumin	Antioksidan
Preservasi	0.029*	0.708 <sup>ns</sup>	-	-	0.003**
Konsentrasi	<0.000***	0.699 <sup>ns</sup>	0.952 <sup>ns</sup>	0.940 <sup>ns</sup>	<0.000***
Waktu	<0.000***	<0.000***	0.046*	0.061 <sup>ns</sup>	<0.000***
Preservasi x Konsentrasi	<0.000***	0.988 <sup>ns</sup>	-	-	0.006**
Preservasi x Waktu	0.416 <sup>ns</sup>	0.098 <sup>ns</sup>	-	-	0.001**
Konsentrasi x Waktu	<0.000***	0.301 <sup>ns</sup>	0.029*	0.052 <sup>ns</sup>	0.294 <sup>ns</sup>
Preservasi x Konsentrasi x Waktu	0.082 <sup>ns</sup>	0.831 <sup>ns</sup>	-	-	0.152 <sup>ns</sup>

Secara umum, pola signifikansi menunjukkan bahwa parameter yang terkait dengan aktivitas oksidatif, total fenolik dan aktivitas antioksidan, sangat dipengaruhi oleh jenis preservasi, konsentrasi, dan waktu penyimpanan. Preservasi memberikan pengaruh signifikan terhadap fenolik ( $p = 0.029$ ) dan aktivitas antioksidan ( $p = 0.003$ ), sementara konsentrasi bahan tambahan berpengaruh sangat nyata terhadap total fenolik dan antioksidan ( $p < 0.001$ ). Waktu penyimpanan juga berperan kuat dan konsisten terhadap kedua parameter ini ( $p < 0.001$ ), menegaskan adanya dinamika degradasi atau

transformasi senyawa bioaktif seiring meningkatnya durasi penyimpanan. Pada parameter lain, vitamin C hanya dipengaruhi sangat signifikan oleh waktu penyimpanan ( $p < 0.001$ ), sedangkan jenis preservasi dan konsentrasi tidak menunjukkan pengaruh nyata ( $p > 0.05$ ). Temuan ini sejalan dengan sifat dasar vitamin C yang mudah teroksidasi secara progresif selama penyimpanan, terlepas dari keberadaan bahan pengawet.

Pada antosianin, hanya faktor waktu dan interaksi konsentrasi  $\times$  waktu yang menunjukkan pengaruh signifikan ( $p = 0.046$  dan  $p = 0.029$ ), sementara pengaruh utama preservasi dan konsentrasi secara tunggal tidak terlihat. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan antosianin lebih ditentukan oleh dinamika penyimpanan dan responsnya bergantung pada tingkat konsentrasi bahan perlakuan. Pada kurkumin, tidak ditemukan pengaruh signifikan dari semua faktor utama maupun interaksi ( $p > 0.05$ ), yang mengisyaratkan bahwa kandungan kurkumin relatif stabil pada rentang kondisi perlakuan yang digunakan. Interaksi antar faktor juga memperlihatkan pola yang relevan. Interaksi preservasi  $\times$  konsentrasi memberikan pengaruh sangat nyata terhadap total fenolik ( $p < 0.001$ ) dan antioksidan ( $p = 0.006$ ), menunjukkan bahwa efektivitas preservasi bergantung pada kombinasi konsentrasinya. Sementara itu, interaksi konsentrasi  $\times$  waktu memengaruhi total fenolik ( $p < 0.001$ ) dan antosianin ( $p = 0.029$ ), menandakan adanya dinamika perubahan senyawa yang sensitif terhadap variasi konsentrasi selama penyimpanan. Namun, interaksi tiga arah tidak menunjukkan pengaruh signifikan pada seluruh parameter yang diuji. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa respons biokimia nira aren terutama digerakkan oleh kombinasi faktor preservasi, konsentrasi, dan waktu, dengan parameter fenolik dan aktivitas antioksidan sebagai indikator paling responsif terhadap perlakuan.

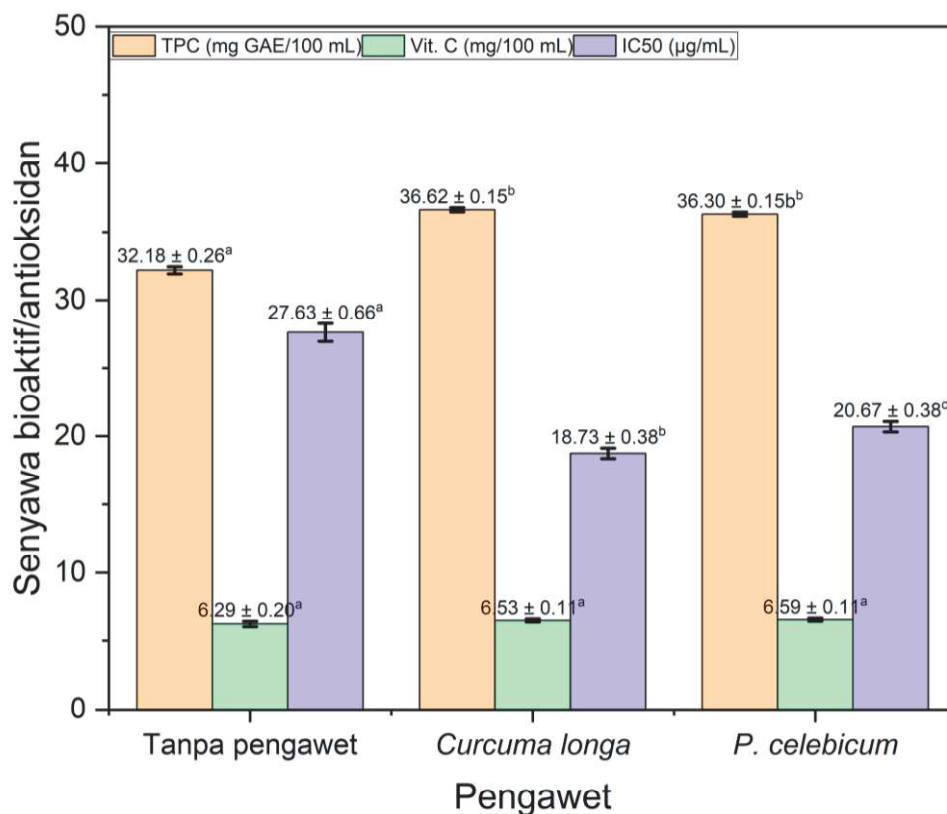
### 2.3.2.1 Pengaruh jenis pengawet terhadap kandungan senyawa bioaktif

Penggunaan pengawet alami dalam proses pengawetan nira aren diduga memengaruhi karakteristik senyawa bioaktif pada nira aren. Gambar 2.14 menyajikan pengaruh penambahan bahan pengawet rimpang kunyit dan akar kayu bayur dibandingkan perlakuan tanpa pengawet.

Gambar 2.14 menunjukkan bahwa jenis pengawet memberikan pengaruh yang berbeda dan signifikan terhadap profil senyawa bioaktif nira aren. Hasil analisis *mixed-effects* menunjukkan bahwa faktor pengawet berpengaruh nyata terhadap total fenolik dan kapasitas antioksidan, dan temuan ini konsisten dengan uji lanjut dengan koreksi Bonferroni (notasi pada grafik 2.14). Pada parameter total fenolik, nira tanpa pengawet memiliki nilai 32.18 mg GAE/100 mL, sedangkan penambahan *Curcuma longa* dan *Pterocarpus celebicum* meningkatkan kandungan fenolik menjadi masing-masing 36.62 mg GAE/100 mL dan 36.30 mg GAE/100 mL. Perbedaan notasi pada grafik secara langsung menunjukkan bahwa kedua pengawet menghasilkan peningkatan fenolik yang signifikan dibanding tanpa pengawet. Secara kimiawi, pola ini dapat dijelaskan oleh keberadaan kurkuminoid pada *C. longa* serta flavonoid, tanin larut air pada *P. celebicum*, yang keduanya dapat menambah fraksi polifenol total sejak awal aplikasi.

Kandungan vitamin C pada nira tanaman palma bervariasi. Pada nira kelapa, kandungan vitamin C dilaporkan bervariasi mulai 11,6 – 65 mg/100 mL (Asgar et al., 2020) (Chinnamma et al., 2019), nira lontar 8.93% w/v (Zongo et al., 2020). Hasil vitamin C pada penelitian ini terlihat lebih rendah dibandingkan tanaman palma lain maupun

tanaman sejenis yang dilaporkan dari penelitian sebelumnya, Meskipun demikian, perbedaan kandungan vitamin hasil tanaman juga dipengaruhi oleh lokasi penanaman, kandungan nutrisi tanah, suhu lingkungan dan waktu panen ataupun penanaman (Dayan & Bayram, 2025; Hernández et al., 2018; Xu et al., 2008).



Gambar 2.14. Perubahan rata rata senyawa bioaktif nira aren dengan perlakuan tanpa pengawet, *C. longa*, dan *P. celebicum*

Kapasitas antioksidan yang direpresentasikan oleh nilai IC<sub>50</sub> menunjukkan pola peningkatan aktivitas yang sejalan dengan temuan pada fenolik. Kandungan fenolik sering kali dihubungkan dengan aktivitas antioksidan dalam bahan makanan dan tanaman karena berperan dalam menetralkan radikal bebas yang dapat menyebabkan kerusakan oksidatif pada sel (Jacobo-Velázquez & Cisneros-Zevallos, 2009; Pinto & Vilela, 2021). Nira tanpa pengawet memiliki IC<sub>50</sub> tertinggi yaitu 27.63 µg/mL (notasi *a*), menunjukkan aktivitas antioksidan yang paling lemah. Penambahan *C. longa* menurunkan IC<sub>50</sub> menjadi 18.73 µg/mL (notasi *b*), sedangkan *P. celebicum* memberikan nilai 20.67 µg/mL (notasi *c*). Perbedaan notasi yang terpisah (*a–b–c*) menunjukkan bahwa ketiga perlakuan berbeda secara signifikan berdasarkan uji Bonferroni. Secara fungsional, penurunan IC<sub>50</sub> ini berarti bahwa kedua pengawet memperkuat kemampuan nira dalam menetralkan radikal bebas. Efek yang lebih kuat pada *C. longa* dapat dikaitkan dengan aktivitas antioksidan intrinsik kurkuminoid, yang memiliki kemampuan tinggi untuk mendonorkan proton dalam reaksi DPPH. Sebaliknya, vitamin C tidak

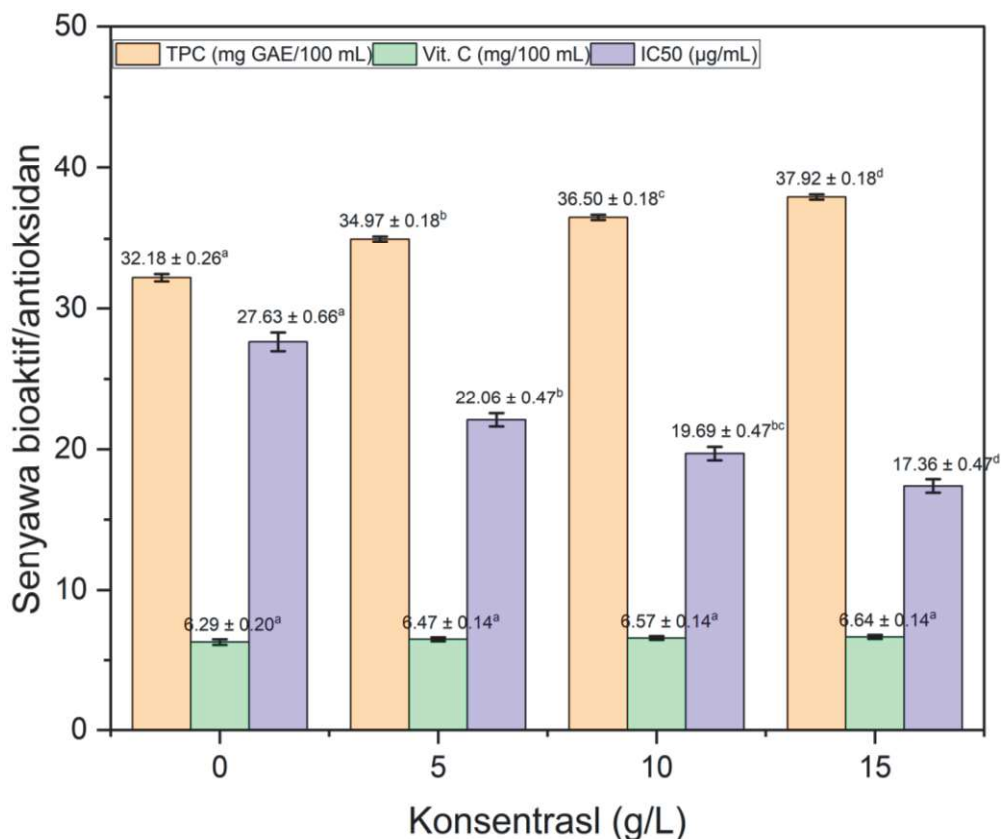
menunjukkan respons yang berarti terhadap jenis pengawet. Ketiga perlakuan berada pada rentang yang sangat berdekatan: 6.28 mg/100 mL (tanpa pengawet), 6.53 mg/100 mL (*C. longa*), dan 6.59 mg/100 mL (*P. celebicum*), dan berada pada notasi yang sama, menandakan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan berdasarkan koreksi Bonferroni. Hal ini dapat dijelaskan oleh sifat askorbat yang sangat labil terhadap oksidasi, sehingga penambahan pengawet berbasis polifenol tidak serta-merta meningkatkan stabilitas atau meningkatkan kadar vitamin C.

Secara keseluruhan, *C. longa* dan *P. celebicum* berperan sebagai pengawet yang tidak hanya melindungi nira, tetapi juga memberikan kontribusi awal terhadap peningkatan kandungan fenolik serta penguatan aktivitas antioksidan. Perbedaannya terletak pada kekuatan kontribusinya: *C. longa* memberikan peningkatan aktivitas antioksidan yang lebih tajam, sedangkan *P. celebicum* memberikan tambahan fenolik yang hampir setara namun dengan efek antioksidan sedikit lebih moderat. Kombinasi temuan ini menegaskan bahwa efektivitas masing-masing pengawet tidak hanya bergantung pada keberadaan polifenol, tetapi juga pada karakteristik kimia spesifik yang menentukan efisiensi transfer elektron dalam sistem nira aren.

#### **2.3.2.2. Pengaruh konsentrasi pengawet terhadap kandungan senyawa bioaktif**

Peningkatan konsentrasi bahan pengawet alami memberikan pengaruh yang konsisten dan signifikan terhadap kandungan senyawa bioaktif nira aren (Gambar 2.15). Pola respons paling jelas terlihat pada total fenolik (TPC), yang meningkat secara teratur seiring bertambahnya konsentrasi. Pada konsentrasi 0 g/L, nilai fenolik tercatat sebesar 32.18 mg GAE/100 mL (notasi *a*), kemudian naik menjadi 34.97 mg GAE/100 mL pada 5 g/L (notasi *b*), meningkat lagi menjadi 36.51 mg GAE/100 mL pada 10 g/L (notasi *c*), dan mencapai 37.92 mg GAE/100 mL pada 15 g/L (notasi *d*). Perbedaan notasi (*a-b-c-d*) menunjukkan bahwa setiap kenaikan konsentrasi menghasilkan peningkatan fenolik yang signifikan berdasarkan uji Bonferroni. Temuan ini juga sejalan dengan hasil *mixed-effects* (Tabel 2.5) di mana konsentrasi merupakan faktor yang sangat signifikan terhadap TPC ( $p < 0.001$ ). Secara kimia, peningkatan ini mencerminkan semakin besarnya fraksi polifenol dari pengawet yang terekstraksi ke dalam matriks nira seiring bertambahnya dosis.

Kandungan fenolik pada nira tanaman palma dilaporkan berbeda sesuai jenis tanaman palma. Pada lontar (*Borassus flabellifer linn*) kandungan fenolik mencapai 25.02 – 67.13 mg GAE/100 mL (Wiboonsirikul, 2024), nira kurma (*Phoenix dactylifera L*) 7.64 mg GAE/100 ml (Ben Thabet et al., 2009), nira aren (*A. pinnata*) di wilayah Sumatera Barat, Indonesia 46.32- 499.32 mg GAE/g (T. Anggraini et al., 2025), nira kelapa (*Cocos nucifera*) 89.03 mg GAE/ 100 g (Pandiselvam et al., 2025). Hasil analisa total kandungan fenolik pada penelitian ini masih berada dalam kisaran angka nira kelompok tanaman palma



Gambar 2.15. Perubahan rata rata nilai warna *senyawa bioaktif* nira aren dengan perlakuan konsentrasi pengawet yang digunakan

Berbeda dengan fenolik, vitamin C tidak menunjukkan sensitivitas terhadap variasi konsentrasi. Nilai askorbat pada seluruh perlakuan berada pada rentang kecil, yaitu 6.29–6.58 mg/100 mL, dan dengan notasi yang sama (a), menandakan tidak ada perbedaan signifikan antara perlakuan 0, 5, 10, maupun 15 g/L. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi pengawet tidak memengaruhi kadar vitamin C secara langsung.

Pengukuran aktifitas antioksidan pada produk pangan dan minuman sangat penting karena menjadi dasar penilaian nilai fungsional, kontrol kualitas, validasi klaim kesehatan, dan perlindungan produk dari kerusakan oksidatif. Pengukuran ini juga penting untuk mendukung inovasi produk dan penelitian, serta memastikan manfaat kesehatan yang dijanjikan benar-benar didukung oleh data ilmiah yang valid (Munteanu & Apetrei, 2021)(Siddeeg et al., 2021; Yoo et al., 2007). Pengujian kapasitas antioksidan pada nira aren dilakukan dengan metode DPPH yang dinyatakan dalam nilai IC<sub>50</sub>. Nilai IC<sub>50</sub> didefinisikan sebagai konsentrasi antioksidan yang dibutuhkan untuk mereduksi 50% konsentrasi awal DPPH. IC<sub>50</sub> secara luas digunakan untuk membandingkan kapasitas antioksidan berbagai senyawa atau ekstrak alami. nilai IC<sub>50</sub> yang rendah berarti aktivitas antioksidan lebih kuat (lebih sedikit antioksidan yang dibutuhkan untuk

menetralkan 50% radikal DPPH), sedangkan nilai  $IC_{50}$  tinggi berarti aktivitas antioksidan lebih lemah (Martinez-Morales et al., 2020).

Hasil pengujian kapasitas antioksidan ( $IC_{50}$  DPPH), menunjukkan pola respons yang berkebalikan dari TPC, tetapi memiliki makna yang selaras. Nilai  $IC_{50}$  pada konsentrasi 0 g/L berada pada 27,63  $\mu\text{g/mL}$  (notasi *a*), kemudian turun tajam menjadi 22,06  $\mu\text{g/mL}$  pada 5 g/L (notasi *b*), menurun lagi menjadi 19,69  $\mu\text{g/mL}$  pada 10 g/L (notasi *bc*), dan mencapai nilai terendah 17,36  $\mu\text{g/mL}$  pada 15 g/L (notasi *c*). Penurunan  $IC_{50}$  ini menunjukkan peningkatan kapasitas antioksidan yang lebih tinggi, dimana semakin kecil nilai  $IC_{50}$ , semakin tinggi kapasitas antioksidan. Perbedaan notasi yang tidak sepenuhnya berurutan tetapi tetap terpisah (*a – b – bc – c*) menunjukkan bahwa sebagian besar kenaikan aktivitas antioksidan antar konsentrasi bersifat signifikan menurut uji Bonferroni.

Secara biokimia, peningkatan aktivitas antioksidan ini selaras dengan peningkatan fenolik, karena polifenol merupakan senyawa aktif yang berperan dalam donasi proton atau elektron untuk menetralkan radikal bebas. Jika pola pada tiga parameter ini dibandingkan secara integratif, terlihat bahwa konsentrasi bahan pengawet lebih dominan memengaruhi komponen fenolik dan kapasitas antioksidan dibanding vitamin C. Hal ini menegaskan bahwa respon bioaktif nira aren sangat dipengaruhi oleh polifenol dari bahan pengawet, dan efek tersebut bersifat *dose-dependent*, makin tinggi konsentrasi, makin kuat peningkatan aktivitas antioksidannya. Fenomena ini menunjukkan bahwa optimasi konsentrasi merupakan aspek kritis dalam pemanfaatan pengawet alami untuk mempertahankan dan meningkatkan nilai fungsional nira aren.

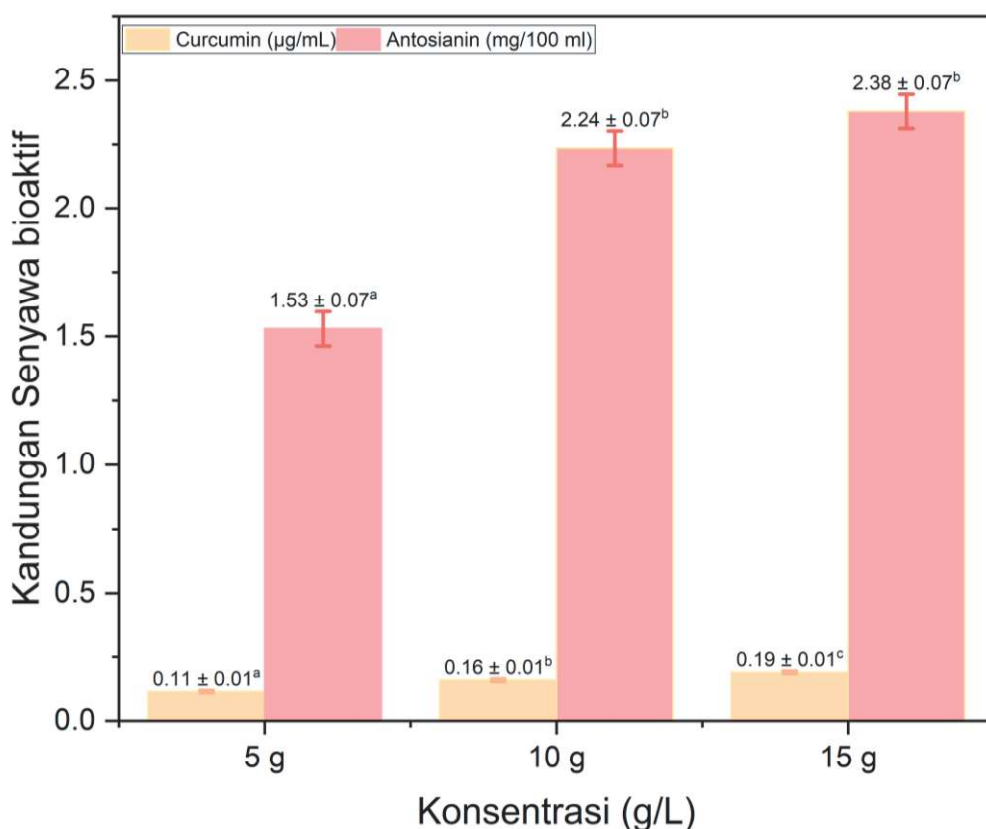
Peningkatan konsentrasi bahan pengawet memberikan pengaruh yang nyata terhadap kandungan kurkumin dan antosianin dalam nira aren (Gambar 2.16). Kurkumin yang berasal dari *Curcuma longa* menunjukkan kenaikan bertahap dari 0.11  $\mu\text{g/mL}$  pada konsentrasi 5 g/L menjadi 0.16  $\mu\text{g/mL}$  pada 10 g/L, dan 0.19  $\mu\text{g/mL}$  pada 15 g/L. Perbedaan antar konsentrasi dinyatakan berbeda signifikan berdasarkan uji lanjut dengan koreksi Bonferroni ( $p < 0.05$ ). Kenaikan bertahap ini sejalan dengan karakter kurkumin yang memiliki kelarutan rendah dalam media berair, sehingga peningkatan konsentrasi lebih banyak meningkatkan jumlah kurkumin yang terdispersi dibandingkan yang terlarut sepenuhnya.

Kunyit merupakan bahan utama dalam minuman herbal tradisional di Indonesia yang dikenal sebagai jamu. Jamu seperti kunyit asam, dikonsumsi karena manfaat kesehatannya, termasuk efek anti-inflamasi dan antioksidan (Estiasih et al., 2024). Kandungan utama kunyit adalah adalah kurkuminoid yang mencapai 2.8 hingga 8% (Kucukgoz et al., 2024; Tonin et al., 2021) diduga berperan dalam berbagai manfaat kesehatan kunyit. Penambahan kunyit dalam sistem pangan diharapkan dapat meningkatkan nilai fungsional sistem pangan seperti makanan atau minuman. Dari hasil penelitian ini terlihat bahwa peningkatan rimpang kunyit mempengaruhi kandungan kurkumin dalam nira aren, dimana semakin banyak rimpang kunyit yang ditambahkan akan semakin tinggi total kandungan kurkuminnya

Pada nira dengan penambahan *P. celebicum*, analisis kandungan antosianin memperlihatkan respons peningkatan yang lebih tinggi. Nilai antosianin meningkat dari 1.55 mg/100 mL pada konsentrasi 5 g/L menjadi 2.25 mg/100 mL pada 10 g/L, dan mencapai 2.40 mg/100 mL pada 15 g/L. Perubahan ini juga terbukti signifikan antar

konsentrasi berdasarkan uji Bonferroni ( $p < 0.05$ ). Pola kenaikan yang lebih tajam ini sesuai dengan sifat antosianin yang bersifat hidrofilik dan mudah larut dalam medium polar seperti nira, sehingga peningkatan konsentrasi bahan meningkatkan hasil ekstraksi yang lebih besar. Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa kurkumin meningkat dalam pola bertahap karena keterbatasan kelarutannya, sedangkan antosianin meningkat lebih kuat karena kelarutannya yang tinggi dalam pelarut berair. Perbedaan sifat kimia kedua senyawa ini menjelaskan perbedaan sensitivitasnya terhadap variasi konsentrasi bahan pengawet.

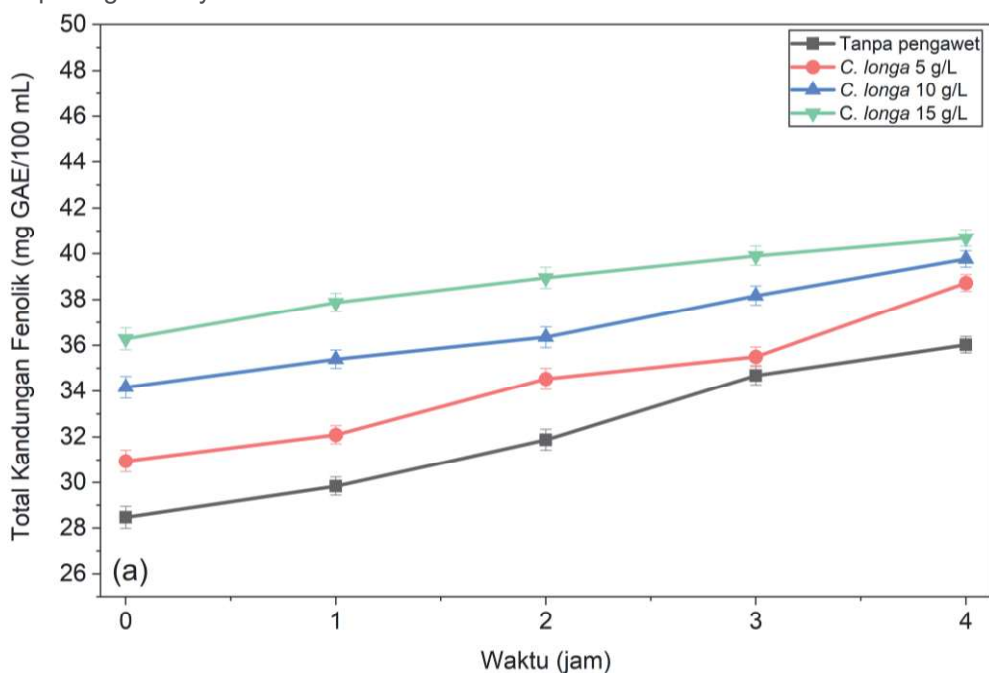
Tanaman Bayur (*P. celebicum*) telah digunakan sebagai bahan pengobatan tradisional untuk mengobati disentri, sakit gigi, dan luka borok (Salempa et al., 2014). Beberapa penelitian melaporkan bahwa kulit kayu *P. celebicum* mengandung flavonoid sebesar 37,4 g/100 g (Anish et al., 2023) pada spesies *Pterospermum javanicum* mengandung 1.0605% (Asnah et al., 2016). Secara tradisional akar kayu bayur telah digunakan dalam mengawetkan nira aren. Nira yang di tambahkan akar pterospermum berwarna merah sehingga diduga mengandung flavanoid dengan kelompok antosianin. Hasil analisis menunjukkan bahwa memang terdapat kandungan antosianin pada nira aren meskipun dalam jumlah sedikit.

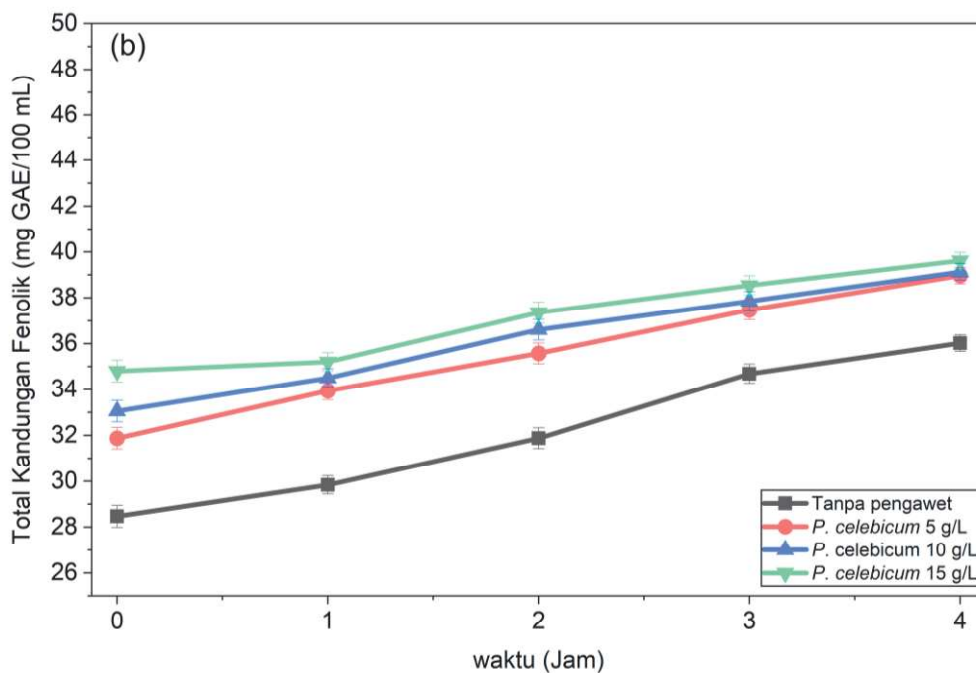


Gambar 2.16. Perubahan rata rata nilai *senyawa bioaktif* nira aren yang diawetkan dengan perlakuan tanpa pengawet, *C. longa*, dan *P. celebicum*

### 2.3.2.3. Pengaruh lama penyimpanan terhadap kandungan senyawa bioaktif Total Kandungan fenolik (TPC)

Perubahan Total Kandungan Fenolik (TPC) pada nira aren selama penyimpanan 0–4 jam ditunjukkan pada Gambar 2.17. Secara umum, tren yang dominan pada seluruh perlakuan adalah peningkatan TPC yang konsisten dan gradual seiring bertambahnya waktu penyimpanan. Tren umum ini menguatkan hasil analisis statistik yang menunjukkan bahwa waktu merupakan faktor paling signifikan yang memengaruhi peningkatan TPC ( $p < 0.001$ ). Perlakuan kontrol (tanpa pengawet) menunjukkan TPC awal yang terendah, meningkat dari sekitar 28 mg GAE/100 mL pada jam ke-0 menjadi sekitar 36 mg GAE/100 mL pada jam ke-4. Penggunaan pengawet alami, baik *Curcuma longa* (Gambar 2.17a) maupun *P. celebicum* (Gambar 2.17b), meningkatkan besaran TPC nira pada setiap titik waktu dibandingkan dengan kontrol. Pada perlakuan *C. longa*, seluruh konsentrasi menjaga TPC di tingkat yang lebih tinggi, dengan nilai maksimum dicapai oleh konsentrasi 15 g/L yang mencapai sekitar 41 mg GAE/100 mL pada jam ke-4, sekaligus menunjukkan laju peningkatan yang relatif paling tajam. Pola serupa ditemukan pada perlakuan *P. celebicum*, di mana konsentrasi 15 g/L juga menghasilkan nilai TPC akhir yang sebanding dengan perlakuan *C. longa* 15 g/L, yaitu berkisar 40 - 41 mg GAE/100 mL pada jam ke-4. Meskipun jenis dan konsentrasi pengawet memengaruhi besaran nilai TPC yang dicapai, hasil analisis yang menunjukkan non-signifikansi interaksi antara pengawet, konsentrasi dan waktu yang mengindikasikan bahwa perbedaan pengawet hanya memengaruhi besaran nilai, bukan arah atau pola tren peningkatannya.

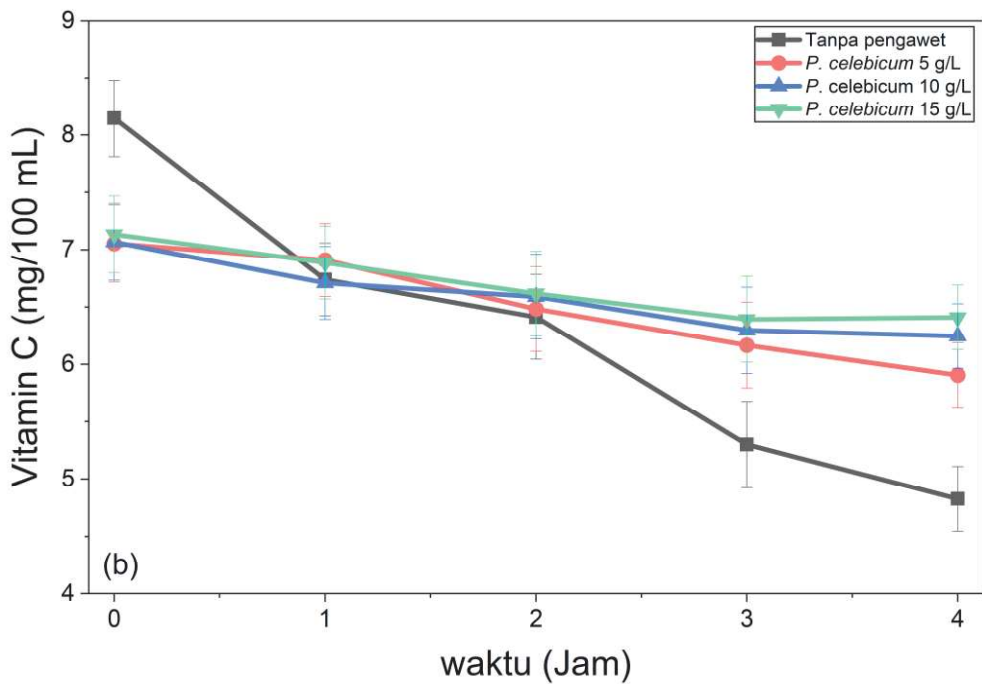
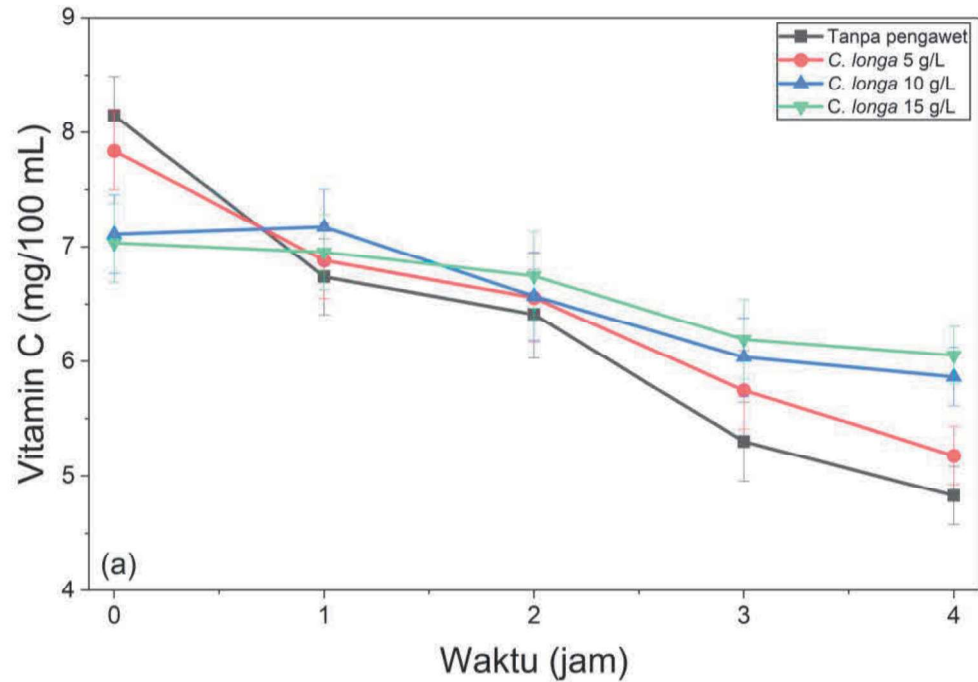




Gambar 2.17. Perubahan rata rata nilai total kandungan fenolik nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

### Vitamin C

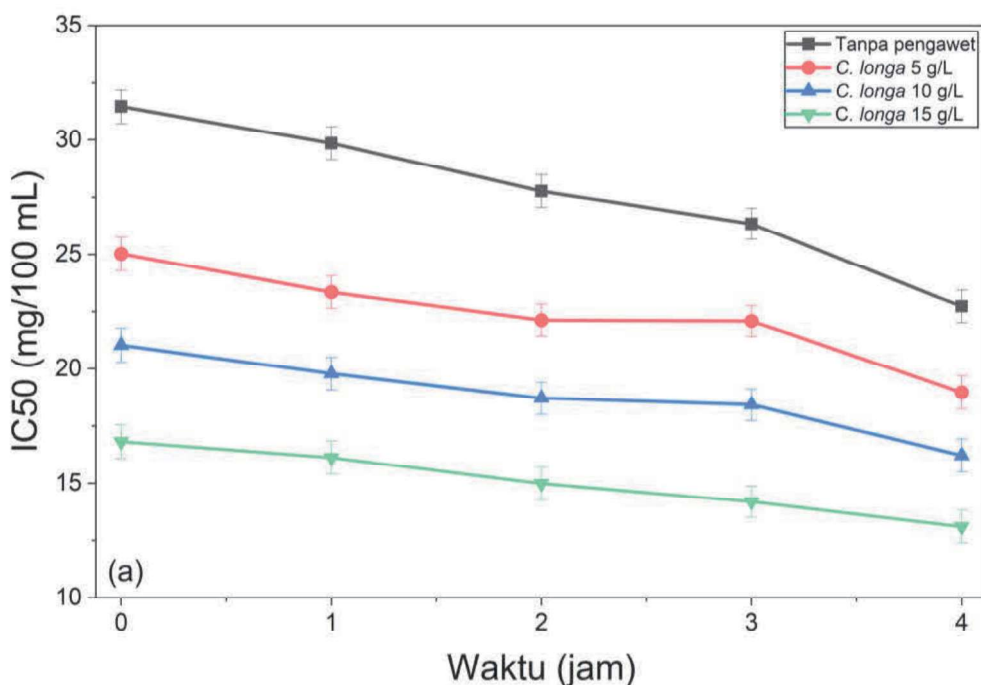
Perubahan kandungan Vitamin C pada nira aren selama periode penyimpanan 0–4 jam ditampilkan pada Gambar 2.18. Berbeda dengan tren peningkatan TPC, seluruh perlakuan menunjukkan penurunan kandungan Vitamin C yang konsisten seiring bertambahnya waktu penyimpanan, sebuah indikasi kuat adanya proses oksidasi dan degradasi askorbat. Nira tanpa pengawet (kontrol) dimulai dengan nilai tertinggi, sekitar 8.2 mg/100 mL, tetapi mengalami laju penurunan paling cepat, berakhir pada nilai terendah sekitar 4.8 mg/100 mL pada jam ke-4. Penggunaan pengawet alami secara signifikan berfungsi sebagai agen anti-degradasi dengan memperlambat laju penurunan ini. Pada perlakuan *Curcuma longa* (Gambar 2.18a), konsentrasi 15 g/L dan 10 g/L paling efektif mempertahankan kandungan Vitamin C tertinggi hingga jam ke-4, dengan 15 g/L mencapai sekitar 6.0 mg/100 mL. Efek yang sedikit lebih unggul dalam mempertahankan Vitamin C terlihat pada perlakuan *P. celebicum* (Gambar 2.18b), di mana konsentrasi 10 g/L dan 15 g/L menunjukkan penurunan paling lambat, menghasilkan nilai akhir yang sedikit lebih tinggi, berkisar 6.4 - 6.5 mg/100 mL pada jam ke-4. Hasil ini menunjukkan bahwa, meskipun penurunan Vitamin C tidak dapat dihindari selama penyimpanan, penambahan pengawet alami, khususnya *P. celebicum* pada konsentrasi 10 g/L dan 15 g/L, membantu mempertahankan nilai nutrisi Vitamin C nira aren.

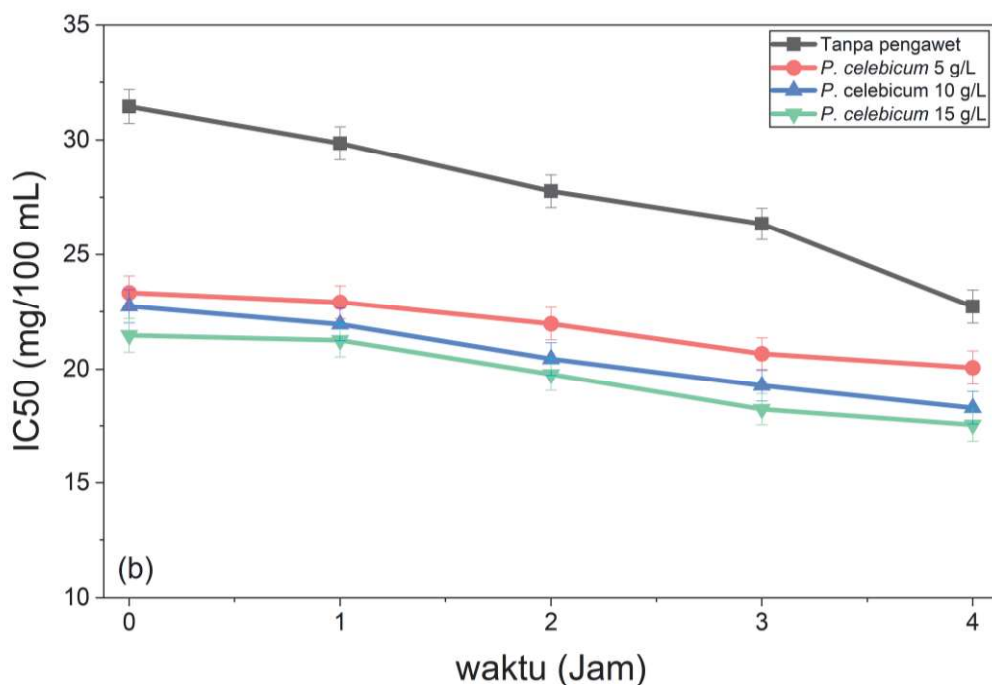


Gambar 2.18. Perubahan rata rata nilai vitamin C nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

### Aktifitas antioksidan ( $IC_{50}$ )

Perubahan nilai  $IC_{50}$  sebagai indikator aktivitas antioksidan nira aren selama periode penyimpanan 0–4 jam ditampilkan pada Gambar 2.19. Secara umum, seluruh perlakuan, baik dengan pengawet maupun kontrol, menunjukkan penurunan nilai  $IC_{50}$  seiring bertambahnya waktu penyimpanan yang artinya menunjukkan peningkatan kapasitas antioksidan. Tren penurunan  $IC_{50}$  ini secara langsung berbanding terbalik dengan TPC yang meningkat, mengindikasikan adanya peningkatan kekuatan aktivitas antioksidan nira seiring berjalannya waktu. Pada nira tanpa pengawet (kontrol),  $IC_{50}$  dimulai dari nilai tertinggi sekitar 31.5  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , yang mencerminkan aktivitas antioksidan terlemah, dan menurun menjadi sekitar 23  $\mu\text{g}/\text{mL}$  pada jam ke-4. Penambahan pengawet alami menunjukkan peningkatan kapasitas aktivitas antioksidan nira, ditunjukkan oleh nilai  $IC_{50}$  awal yang lebih rendah dibandingkan kontrol. Untuk perlakuan *Curcuma longa* (Gambar 2.20a), terdapat hubungan dosis-respons yang jelas: konsentrasi yang lebih tinggi menghasilkan  $IC_{50}$  yang lebih rendah. Konsentrasi 15 g/L *C. longa* memberikan aktivitas antioksidan terkuat secara keseluruhan, dimulai pada sekitar 16.5  $\mu\text{g}/\text{mL}$  dan mencapai nilai terendah sekitar 13  $\mu\text{g}/\text{mL}$  pada jam ke-4. Pola serupa, meskipun dengan efektivitas sedikit di bawah *C. longa*, terlihat pada perlakuan *P. celebicum* (Gambar 2.20b), di mana konsentrasi 15 g/L mencapai nilai  $IC_{50}$  akhir sekitar 18  $\mu\text{g}/\text{mL}$ . Dengan demikian, meskipun waktu penyimpanan mendorong peningkatan aktivitas antioksidan, penggunaan pengawet berfungsi meningkatkan kapasitas antioksidan, dengan konsentrasi 15 g/L *Curcuma longa* menjadi perlakuan yang paling efektif dalam meningkatkan dan mempertahankan kemampuan antioksidan nira aren.



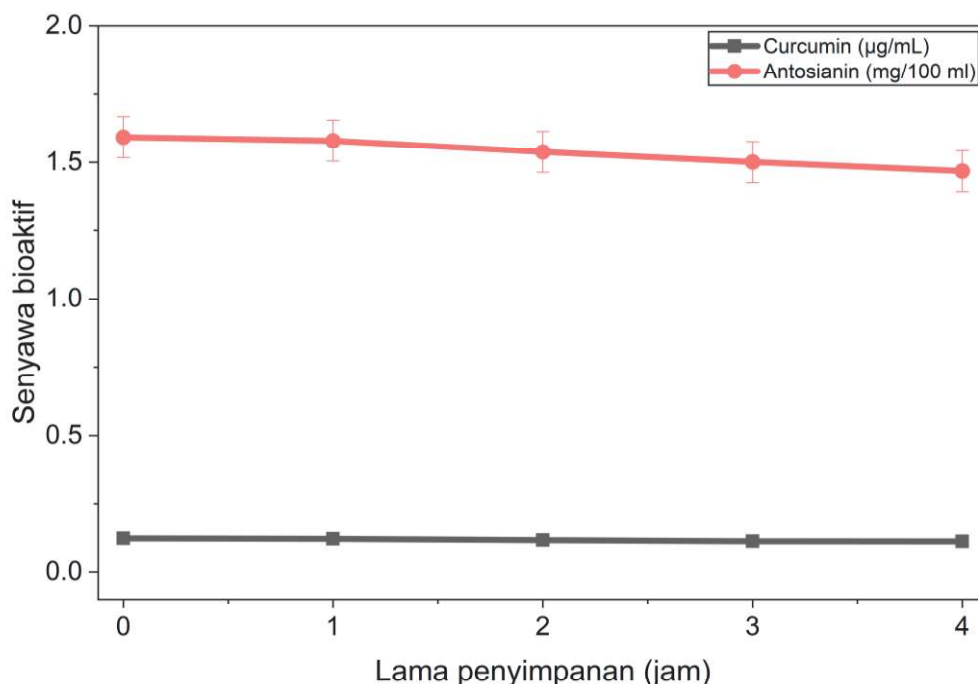


Gambar 2.19. Perubahan rata rata nilai  $IC_{50}$  nira aren yang diawetkan dengan pengawet (a) kontrol dan kunyit (*C. longa*) (b). kontrol dan Akar kayu bayur (*P. celebicum*) selama penyimpanan

### Kurkumin dan antosianin

Stabilitas dua senyawa bioaktif utama, kurkumin dan antosianin, dalam nira aren selama periode penyimpanan 0–4 jam ditampilkan pada Gambar 2.20. Secara umum, kedua senyawa menunjukkan perubahan yang relatif kecil sepanjang waktu pengamatan, sehingga pada rentang penyimpanan ini penurunannya tampak landai.

Kandungan kurkumin menunjukkan kecenderungan turun tipis selama penyimpanan 0–4 jam, dari 0.122 menjadi 0.110  $\mu\text{g/mL}$  (SE  $\pm 0.0064$ ), sehingga pola grafik tampak hampir datar. Sementara itu, antosianin juga menurun secara bertahap dari 1.59 menjadi 1.47 mg/100 mL (SE  $\pm 0.07516$ ) tanpa perubahan yang tajam. Penurunan kecil ini mungkin disebabkan oleh degradasi oksidatif ringan atau perubahan pH, namun stabilitas Antosianin secara keseluruhan terlihat masih tinggi selama 4 jam penyimpanan. Dengan demikian, kedua senyawa bioaktif ini menunjukkan ketahanan yang kuat terhadap kondisi penyimpanan nira dalam jangka waktu pendek, menjadikannya kandidat yang baik untuk mempertahankan manfaat fungsional nira.



Gambar 2.20. Perubahan rata rata nilai warna kurkumin dan antosianin nira aren

Hasil-hasil diatas menunjukkan bahwa dinamika perubahan senyawa bioaktif pada nira aren tidak terjadi secara seragam, melainkan bergantung pada sifat kimiawi masing-masing komponen dan interaksinya dengan kondisi lingkungan selama penyimpanan. Perbedaan respons antara fenolik, vitamin C, aktivitas antioksidan, kurkumin, dan antosianin juga mengindikasikan adanya perbedaan mekanisme degradasi, stabilitas, maupun potensi kontribusi masing-masing senyawa terhadap kualitas fungsional nira.

Secara keseluruhan, tiga parameter, total fenolik (TPC), vitamin C, dan aktivitas antioksidan ( $IC_{50}$ ), menunjukkan respons yang nyata terhadap waktu penyimpanan, sedangkan dua senyawa lain, kurkumin dan antosianin, mempertahankan stabilitasnya dalam rentang 4 jam penyimpanan. Fenolik dan  $IC_{50}$  merupakan dua parameter yang menunjukkan dinamika paling jelas. Peningkatan signifikan TPC pada seluruh perlakuan sejalan dengan penurunan konsisten nilai  $IC_{50}$ , yang mengindikasikan peningkatan kapasitas penangkapan radikal bebas. Hubungan ini mendukung pemahaman bahwa fenolik merupakan kontributor utama aktivitas antioksidan dalam nira palma. Studi oleh Das & Tamang (2023), melaporkan bahwa selama fermentasi alami *toddy* dari nira Palmyra dan kurma liar di India, kandungan fenolik total dan flavonoid meningkat secara bertahap dari nira segar (0 jam) hingga 48 jam fermentasi. Hasil yang serupa juga di laporkan Ghosh et al. (2015), yang menunjukkan bahwa penurunan pH sekitar 5,5 selama fermentasi nira *Borassus flabellifer* 72 jam menunjukkan nilai kandungan fenolik tertinggi. Peningkatan ini dikaitkan dengan aktivitas enzimatik mikroorganisme dominan seperti *Saccharomyces cerevisiae* dan *Lactiplantibacillus plantarum*, yang mampu

melepaskan senyawa fenolik terikat dari dinding sel atau kompleks protein-karbohidrat (Das & Tamang, 2023).

Sebaliknya, vitamin C menunjukkan tren penurunan yang cepat, memperlihatkan sensitivitas tinggi terhadap mekanisme oksidasi yang lazim terjadi pada bahan pangan. Fenomena ini selaras dengan studi sebelumnya melaporkan bahwa degradasi vitamin C dipercepat oleh oksidasi enzimatis (misalnya oleh asam askorbat oksidase) dan paparan oksigen (Xia et al., 2011). Penggunaan pengawet akar kayu bayur dan rimpang kunyit membatasi aktivitas oksidatif sehingga dapat memperlambat penurunan vitamin C. Temuan ini juga relevan dengan Ghosh et al. (2015), yang menunjukkan bahwa kestabilan vitamin C dan aktivitas antioksidan lebih terjaga pada kondisi minim paparan oksidasi (Ghosh et al., 2015). Meski demikian, pola penurunan vitamin C tidak diikuti oleh penurunan kapasitas antioksidan secara paralel, menandakan bahwa kontribusi vitamin C terhadap aktivitas antioksidan dalam sistem ini relatif kecil dibandingkan senyawa fenolik.

Sementara itu, kurkumin dan antosianin tidak menunjukkan perubahan signifikan selama penyimpanan. Kurkumin yang berasal dari rimpang *C. longa* dan antosianin dari akar *P. celebicum* mempertahankan konsentrasi awalnya, menandakan stabilitas jangka pendek kedua pigmen tersebut pada kondisi penyimpanan moderat. Hal ini sejalan dengan laporan bahwa degradasi kurkumin umumnya memerlukan paparan cahaya atau oksigen dalam durasi lebih panjang (Schneider et al., 2015; Wang et al., 1997), sedangkan antosianin sensitif terhadap suhu tinggi, pH ekstrem, atau oksidasi (Castañeda-Ovando et al., 2009). Meskipun Penurunan kandungan antosianin selama penyimpanan pada sistem pangan telah dilaporkan sebelumnya. Misalnya, pada jus blueberry menunjukkan penurunan kandungan antosianin pada suhu penyimpanan yang lebih tinggi (Zou et al., 2015). Yogurt dengan campuran buah juga menunjukkan penurunan signifikan dalam kandungan antosianin selama penyimpanan (Šcibisz et al., 2019). Pada jus blackberry, kandungan antosianin berkurang selama penyimpanan, meskipun penambahan gula tertentu dan asam klorogenat awalnya meningkatkan stabilitas (Kopjar et al., 2012). Pada nira aren, sesuai hasil penelitian ini, penyimpanan jangka pendek belum memberikan signifikansi perubahan yang berarti.

### **2.3.3. Analisis Hubungan dan Pengelompokan Variabel Fisikokimia dan Bioaktif Selama Penyimpanan Nira Aren**

Dalam penelitian yang melibatkan banyak parameter fisikokimia, sering kali antarvariabel tidak berdiri sendiri, melainkan saling berhubungan dan memengaruhi. Hubungan semacam ini tidak dapat dijelaskan secara tuntas hanya melalui analisis univariat, sehingga diperlukan pendekatan multivariat untuk melihat pola keterkaitan dan pengelompokan variabel. Analisis hubungan antar variabel, seperti korelasi Pearson, dapat memberikan gambaran awal mengenai arah dan kekuatan hubungan Selanjutnya, teknik reduksi dimensi seperti *Principal Component Analysis* (PCA) berguna untuk menyederhanakan data kompleks menjadi komponen utama yang lebih mudah ditafsirkan. kombinasi ketiga pendekatan ini dipandang penting untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai faktor dominan yang menentukan kualitas sampel yang diteliti.

### 2.3.3.1. Uji Korelasi Pearson

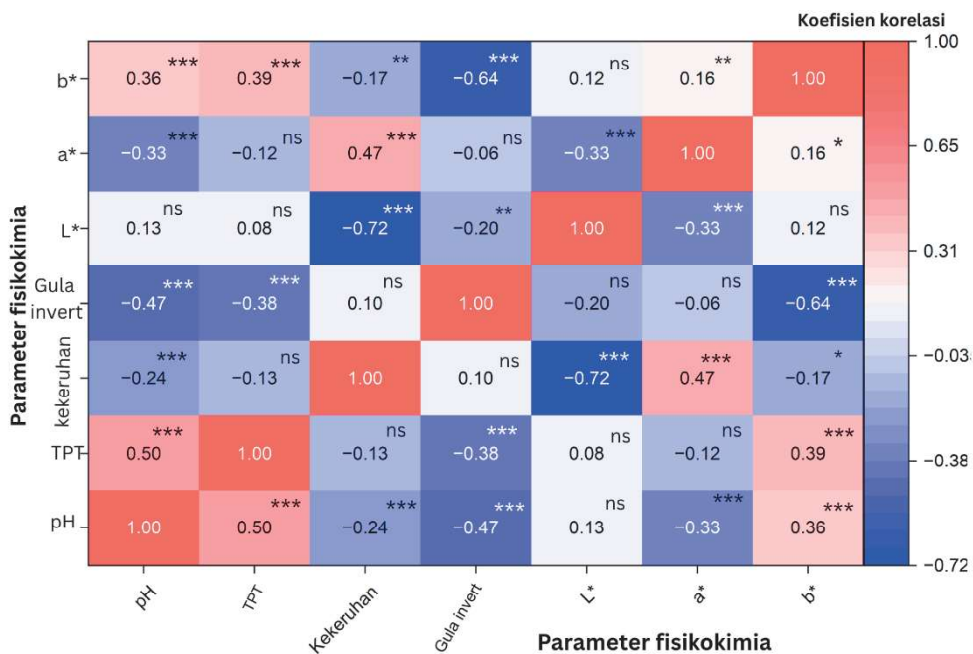
Uji korelasi membantu dalam memvalidasi data yang diperoleh dari berbagai hasil analisis. Uji korelasi membantu dalam mengidentifikasi apakah ada hubungan antara dua variabel dan seberapa kuat hubungan tersebut, hal ini penting untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan konsisten dan dapat diandalkan sebelum melanjutkan ke analisis multivariat yang lebih kompleks (Roy-García et al., 2019; Skov et al., 2014). Uji korelasi merupakan metode statistik yang digunakan untuk menggambarkan arah, kekuatan, dan signifikansi hubungan antara dua variabel. Hubungan tersebut dinyatakan melalui koefisien korelasi ( $r$ ), yang nilainya berada pada rentang  $-1$  hingga  $+1$ . Nilai  $r$  positif menunjukkan bahwa peningkatan satu variabel diikuti oleh peningkatan variabel lainnya (hubungan searah), sedangkan nilai  $r$  negatif menunjukkan hubungan berlawanan arah. Nilai  $r$  yang mendekati nol menandakan hubungan yang lemah atau tidak ada hubungan linier. Secara umum, kekuatan hubungan dapat dikategorikan sebagai kecil.

Analisis korelasi Pearson dilakukan untuk mengevaluasi hubungan linear antara parameter fisikokimia dan bioaktif nira aren pada dua rentang waktu penyimpanan, yaitu 0–8 jam (fisikokimia) dan 0–4 jam (fisikokimia–bioaktif). Hasil analisis disajikan melalui heatmap pada Gambar 2.21 dan Gambar 2.22, yang masing-masing menunjukkan dinamika variabel dalam dua rentang waktu tersebut.

Pada penyimpanan delapan jam (Gambar 2.21), hubungan antarparameter fisikokimia menunjukkan pola korelasi signifikan yang konsisten dan mencerminkan perubahan visual dan kimiawi yang semakin jelas. Parameter pH berkorelasi signifikan dengan TPT, gula invert, serta indeks warna  $a^*$  dan  $b^*$ , menunjukkan bahwa pH berperan penting dalam dinamika perubahan fisikokimia. Korelasi positif pH dengan TPT mengindikasikan peningkatan padatan terlarut pada kondisi pH lebih tinggi, sementara korelasi negatif pH dengan gula invert menandakan bahwa peningkatan gula invert berkaitan dengan penurunan pH. Korelasi pH dengan nilai  $a^*$  dan  $b^*$  menunjukkan bahwa perubahan warna berlangsung seiring dinamika keasaman. Pada durasi ini, kekeruhan muncul sebagai parameter yang paling kuat dan stabil, dibuktikan oleh korelasi sangat signifikan terhadap  $L^*$  dan  $a^*$ . Hubungan tersebut menandakan bahwa peningkatan kekeruhan selalu diikuti penggelapan (penurunan  $L^*$ ) dan peningkatan komponen merah (kenaikan  $a^*$ ). Selain itu, korelasi signifikan antara gula invert dengan parameter warna  $L^*$  dan  $b^*$  menunjukkan perubahan warna yang semakin intens seiring bertambahnya waktu penyimpanan. Pada tahap ini, reaksi kimia yang berlangsung sejak jam-jam awal telah bermigrasi menjadi perubahan fisik yang dapat diamati melalui dinamika kekeruhan dan warna.

Berbeda dengan pola pada delapan jam, penyimpanan empat jam memperlihatkan bahwa perubahan paling awal yang terjadi pada nira aren lebih menonjol pada parameter bioaktif (Gambar 2.22). Pada durasi ini, pH tidak lagi membentuk korelasi signifikan dengan sebagian besar parameter fisikokimia, tetapi menunjukkan korelasi signifikan dengan fenolik total dan vitamin C. Korelasi negatif pH dengan fenolik total mengindikasikan bahwa kondisi lebih asam berkaitan dengan penurunan fenolik total, sementara korelasi positif pH dengan vitamin C menunjukkan kestabilan vitamin C yang lebih baik pada pH yang relatif lebih tinggi. Selain itu, parameter  $IC_{50}$  memperlihatkan hubungan signifikan dengan pH, fenolik total, dan vitamin C, yang secara keseluruhan menegaskan bahwa kapasitas antioksidan pada jam-jam pertama

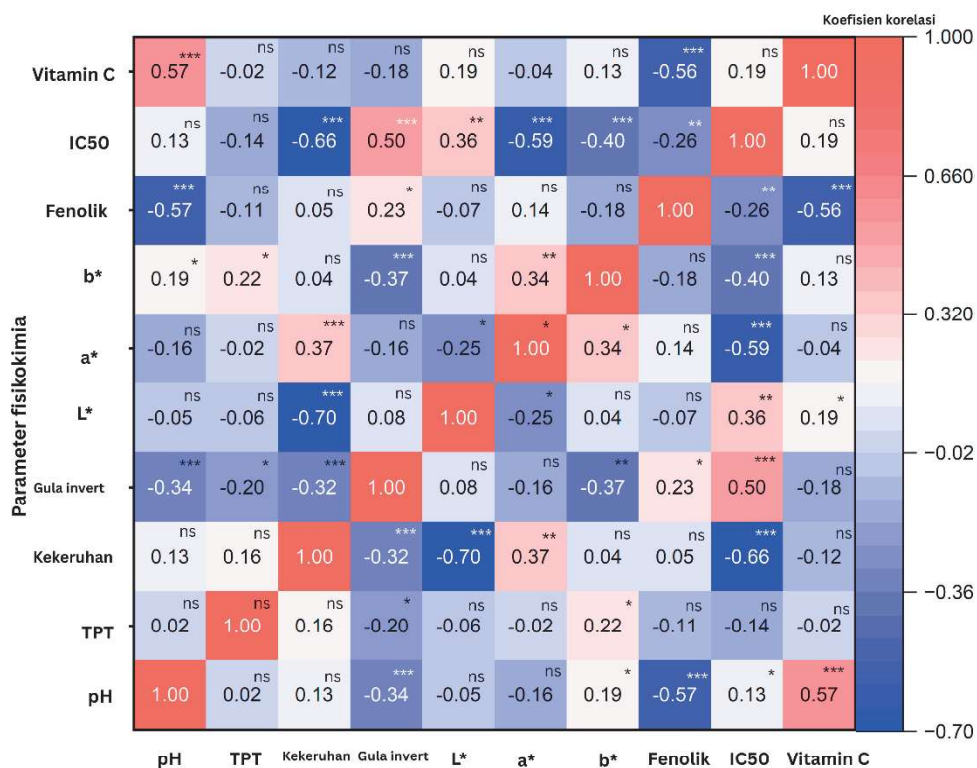
penyimpanan dipengaruhi oleh dinamika kedua kelompok senyawa tersebut. Pola ini menunjukkan bahwa respons kimia muncul lebih cepat daripada perubahan fisik, sehingga parameter bioaktif menjadi indikator paling sensitif pada durasi pendek. Walaupun perubahan fisik belum dominan pada empat jam, kekeruhan tetap menunjukkan korelasi signifikan dengan  $L^*$  dan  $a^*$ , pola yang konsisten dengan durasi delapan jam. Kehadiran pola ini pada dua durasi mengindikasikan bahwa perubahan visual merupakan indikator awal dan konstan dari deteriorasi nira aren.



Gambar 2.21. Heatmap korelasi Pearson antar parameter fisikokimia nira aren (pH, TPT, kekeruhan, gula invert,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) selama penyimpanan 0–8 jam pada perlakuan pengawet alami. Warna merah menunjukkan korelasi positif dan biru korelasi negatif ( $r$ ). Tingkat signifikansi ditandai dengan \* ( $p < 0,05$ ), \*\* ( $p < 0,01$ ), \*\*\* ( $p < 0,001$ ); ns = tidak signifikan.

Integrasi kedua dataset memperlihatkan pola konsisten yang menggambarkan mekanisme perubahan mutu nira aren secara bertahap. Kekeruhan merupakan parameter yang paling stabil dan paling konsisten dalam dua durasi, selalu berkorelasi signifikan dengan penggelapan (penurunan  $L^*$ ) dan peningkatan komponen merah (kenaikan  $a^*$ ). Hal ini menunjukkan bahwa perubahan visual merupakan indikator paling awal sekaligus paling dapat diandalkan dalam mendeteksi deteriorasi. Reaksi pencoklatan non-enzimatis, yang tercermin dari korelasi signifikan gula invert terhadap  $b^*$ , terlihat sudah dimulai pada empat jam dan menguat pada delapan jam. Pola ini menunjukkan bahwa proses pencoklatan terjadi sejak fase awal penyimpanan dan berkembang lebih intens pada fase lanjutan. Selain itu, pH terlihat menjalankan peran ganda yang berubah sepanjang waktu. Pada empat jam, pH berperan sebagai pengatur respons kimia awal yang melibatkan fenolik dan vitamin C, sedangkan pada delapan jam pH memengaruhi perubahan fisikokimia melalui hubungannya dengan TSS dan gula invert. Pergeseran peran ini menunjukkan bahwa pH merupakan variabel fundamental

yang mengendalikan transisi antara fase kimia awal dan fase fisik lanjutan dalam proses deteriorasi nira aren. Secara keseluruhan, struktur korelasi pada dua durasi penyimpanan mengungkapkan bahwa perubahan kimiawi mendahului perubahan fisik, dan bahwa indikator paling konsisten sepanjang proses adalah perubahan pH, kekeruhan dan parameter warna, yang memberikan cerminan visual dari reaksi kimia dan fisik yang berlangsung di dalam sistem.



Gambar 2.22. Heatmap korelasi Pearson antara parameter fisikokimia (pH, TPT, kekeruhan, gula invert, L\*, a\*, b\*) dan parameter bioaktif (fenolik, IC50, vitamin C) pada nira aren selama penyimpanan 0–4 jam. Warna merah menunjukkan korelasi positif dan biru korelasi negatif (r). Tingkat signifikansi ditandai dengan \* (p < 0,05), \*\* (p < 0,01), \*\*\* (p < 0,001); ns = tidak signifikan.

Meskipun analisis korelasi Pearson mampu menunjukkan hubungan signifikan antarparameter pada penyimpanan empat dan delapan jam, pendekatan ini memiliki keterbatasan karena hanya menggambarkan relasi berpasangan dan tidak dapat menangkap struktur kovariansi multivariabel yang lebih kompleks. Dinamika mutu nira aren melibatkan interaksi simultan antara perubahan kimia awal, pembentukan koloid, serta reaksi pencoklatan. Kompleksitas ini menuntut pendekatan statistik multivariat yang mampu mereduksi variabel, mengidentifikasi kelompok parameter yang bergerak bersama, dan menentukan faktor dominan yang mendasari perubahan mutu. Oleh karena itu, Principal Component Analysis (PCA) digunakan sebagai analisis lanjutan untuk memetakan struktur laten antarparameter, menangkap variansi terbesar dalam

data, serta memberikan visualisasi komprehensif mengenai pengelompokan variabel dan pemisahan antarperlakuan yang tidak dapat diungkap melalui korelasi bivariabel

### 2.3.3.2. Uji PCA

Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa setiap parameter dalam nira aren tidak berdiri sendiri, melainkan saling berhubungan dan membentuk pola keterkaitan yang kompleks. Namun, korelasi hanya mampu menggambarkan hubungan sepasang variabel (bivariate) tanpa memperlihatkan struktur keseluruhan data yang terdiri atas banyak variabel sekaligus. Untuk itu, diperlukan pendekatan multivariat yang mampu mereduksi dimensi data dan mengekstraksi faktor-faktor utama yang mendasari perubahan mutu. *Principal Component Analysis* (PCA) dipilih karena mampu merangkul variasi data ke dalam sejumlah kecil komponen utama, sehingga memudahkan identifikasi variabel dominan yang mempengaruhi kualitas produk. Analisis ini juga dapat memperlihatkan pemisahan antarperlakuan atau waktu penyimpanan dalam bentuk score plot dan loading plot, yang disajikan dalam gambar bi-plot, sehingga interpretasi diharapkan dapat lebih komprehensif.

Analisis Komponen Utama/*Principal Component Analysis* (PCA) digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi pola perubahan multivariat pada kualitas nira aren selama penyimpanan serta untuk memetakan kontribusi masing-masing parameter fisik, kimia, dan bioaktif terhadap dinamika kerusakan produk. PCA dilakukan dalam dua tahap, yaitu pada dataset penyimpanan 0–8 jam yang berisi parameter fisik saja, meliputi pH, total padatan terlarut (TSS), kekeruhan, gula invert, dan parameter warna ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), serta pada dataset penyimpanan 0–4 jam yang mengintegrasikan parameter fisik, kimia, dan bioaktif. Pada tahap pertama, PCA difokuskan pada perubahan fisik untuk validasi titik waktu kritis. Pada tahap kedua, PCA diperluas untuk mengevaluasi perubahan bioaktif pada rentang waktu kritis tersebut. Pendekatan dua tahap ini memberikan dasar kuantitatif dalam memahami stabilitas nira aren.

Sebelum uji PCA dilakukan, kelayakan data dievaluasi dengan indeks KMO (Kaiser–Meyer–Olkin) dan Bartlett's Test of Sphericity karena PCA hanya tepat bila terdapat korelasi yang memadai antar Variabel. KMO menilai kecukupan sampel untuk membentuk struktur faktor, sedangkan uji Bartlett menguji hipotesis bahwa matriks korelasi adalah identitas (Lanzillotti et al., 2018; Zalma et al., 2015). Mengacu pada literatur, nilai KMO  $\geq 0,50$  dipakai sebagai batas minimal kelayakan untuk analisis faktor/PCA, sedangkan nilai sekitar 0,53 juga dikategorikan “acceptable” dalam penerapan PCA pada data terapan lainnya (Melkamu Asaye et al., 2022; Rojas-Valverde et al., 2020). Pada studi ini, hasil uji kelayakan (Tabel 2.6) menunjukkan: (i) data fisikokimia memiliki KMO = 0,612 dan 0.636 (kategori sedang) dan Bartlett  $p < 0,001$ , sehingga memenuhi prasyarat PCA dan pengujian dapat dilanjutkan untuk mereduksi dimensi dan mengidentifikasi pola utama pada set data.

Analisis *Principal Component Analysis* (PCA) dilakukan pada data yang telah distandarisasi (Z-score) untuk mereduksi dimensi dan mengidentifikasi struktur multivariat perubahan mutu nira aren pada tiga perlakuan (tanpa pengawet, Curcuma longa, dan *Pterospermum celebicum*) dengan tiga ulangan. PCA diterapkan pada dua set data, yaitu (i) parameter fisikokimia selama penyimpanan 0–8 jam dan (ii) parameter

fisikokimia serta bioaktif selama penyimpanan 0–4 jam. Jumlah komponen utama ditetapkan menggunakan kriteria eigenvalue  $\geq 1$  (Tabel 2.7).

Tabel 2.6. kelayakan uji PCA berdasarkan nilai KMO dan Bartlett test

Data / Variabel	Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)	Bartlett's Test $\chi^2$ (df)	Sig. (p)
Data fisikokimia (penyimpanan 8 jam)	0.612	468.245 (df = 21)	< 0.001
Data fisikokimia dan bioaktif (penyimpanan 4 jam)	0.636	574.889 (df = 45)	< 0.001

PCA menghasilkan tiga komponen utama (PC1–PC3) dengan eigenvalue  $\geq 1$  yang secara kumulatif menjelaskan 78,15% varians total (Tabel 2.6) pada lama penyimpanan 0–8 jam,. Kontribusi masing-masing komponen adalah 38,02% (PC1), 25,70% (PC2), dan 14,43% (PC3). Pada penyimpanan 0–4 jam dengan integrasi variabel fisikokimia dan bioaktif, PCA menghasilkan empat komponen utama (PC1–PC4) dengan varians kumulatif 76,42%, terdiri atas 28,77% (PC1), 24,31% (PC2), 13,05% (PC3), dan 10,28% (PC4) (Tabel 2.7). Hasil ini menunjukkan bahwa struktur data pada kedua interval dapat direpresentasikan secara ringkas melalui PCA, sehingga pemantauan perubahan mutu tidak perlu dibahas sebagai banyak variabel terpisah, melainkan sebagai sejumlah faktor dominan.

Tabel 2.7. Nilai Eigenvalue dan Persentase Keragaman Perlakuan Penyimpanan 8 Jam dan 4 Jam.

Komponen	Penyimpanan 8 jam		Penyimpanan 4 jam	
	Eigenvalue	Persentase Variasi	Eigenvalue	Persentase Variasi
PC1	2.66	38.02%	2.88	28.77%
PC2	1.80	25.70%	2.43	24.31%
PC3	1.01	14.43%	1.31	13.05%
PC4	0.57	8.12%	1.03	10.28%
PC5	0.40	5.71%	0.72	7.22%
PC6	0.36	5.18%	0.54	5.45%
PC7	0.20	2.85%	0.41	4.15%
PC8			0.29	2.95%
PC9			0.28	2.78%
PC10			0.10	1.04%

Pada penyimpanan 0–8 jam, PC1 terutama dibentuk oleh pH (+0,448), gula invert (−0,421), dan  $b^*$  (+0,391), dengan kontribusi kuat tambahan dari TPT (+0,385) dan kekeruhan (−0,380) (Tabel 2.8). Struktur ini menunjukkan bahwa sumbu utama perubahan (PC1) merepresentasikan gradien yang mempertemukan kelompok variabel “pH–TPT–warna lebih tinggi” dengan “kekeruhan–gula invert” pada arah yang berlawanan. PC2 didominasi oleh  $a^*$  (+0,480) dan kekeruhan (+0,476) yang berlawanan dengan  $L^*$  (−0,441), sehingga PC2 menangkap pemisahan yang kuat pada dimensi kekeruhan/komponen merah versus kecerahan. PC3 terutama dimuat oleh  $a^*$  (−0,494),

pH (+0,461), dan L\* (-0,430), sehingga berperan sebagai dimensi tambahan yang memperhalus variasi internal sampel.

Pada penyimpanan 0–4 jam, struktur komponen menunjukkan integrasi yang lebih kuat antara variabel fisik dan bioaktif (Tabel 2.9). PC1 didominasi oleh IC<sub>50</sub> (-0,534) bersama kekeruhan (+0,478) dan a\* (+0,390) (dengan kontribusi tambahan L\* -0,359). Dengan demikian, PC1 merupakan sumbu utama yang menggabungkan perubahan fisik (kekeruhan/warna) dan respons bioaktif (IC<sub>50</sub>). PC2 terutama dibentuk oleh pH (+0,530), fenolik total (-0,520), dan vitamin C (+0,500), menunjukkan bahwa dimensi ini terutama memuat variasi kimia–bioaktif pada fase awal. PC3 didominasi oleh L\* (+0,563) dan b\* (+0,540) yang berlawanan dengan kekeruhan (-0,417), sehingga memuat pemisahan pada karakter visual (kecerahan–kekuningan). PC4 terutama ditentukan oleh TPT (-0,844) dengan kontribusi a\* (+0,438) dan vitamin C (+0,262), menunjukkan bahwa variasi padatan terlarut membentuk dimensi tambahan yang relevan pada interval 0–4 jam.

Tabel 2.8. Ringkasan variabel dominan pembentuk komponen utama (PCA) nira aren pada penyimpanan 0–8 jam (data distandarisasi z-score)

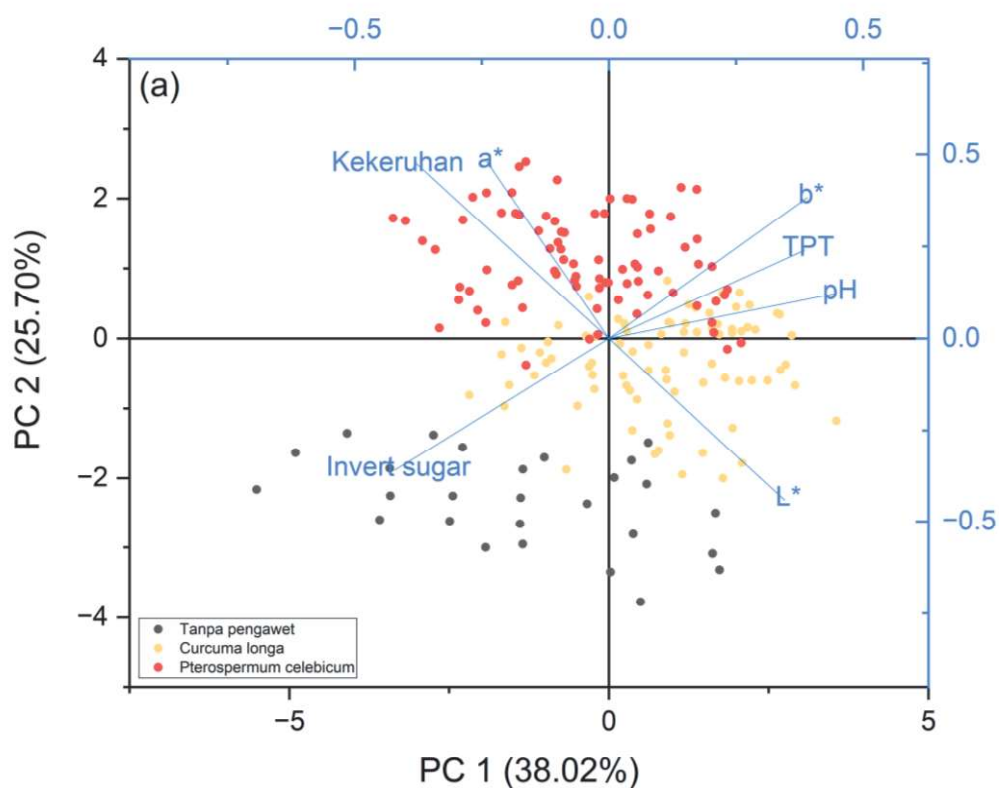
Komponen	Eigenvalue	Varians (%)	Kumulatif (%)	Variabel dominan (loading)
PC1	2,66	38,02	38,02	pH (+0,448); gula invert (-0,421); b* (+0,391) (TPT +0,385; kekeruhan -0,380
PC2	1,80	25,70	63,72	a* (+0,480); kekeruhan (+0,476); L* (-0,441)
PC3	1,01	14,43	78,15	a* (-0,494); pH (+0,461); L* (-0,430)

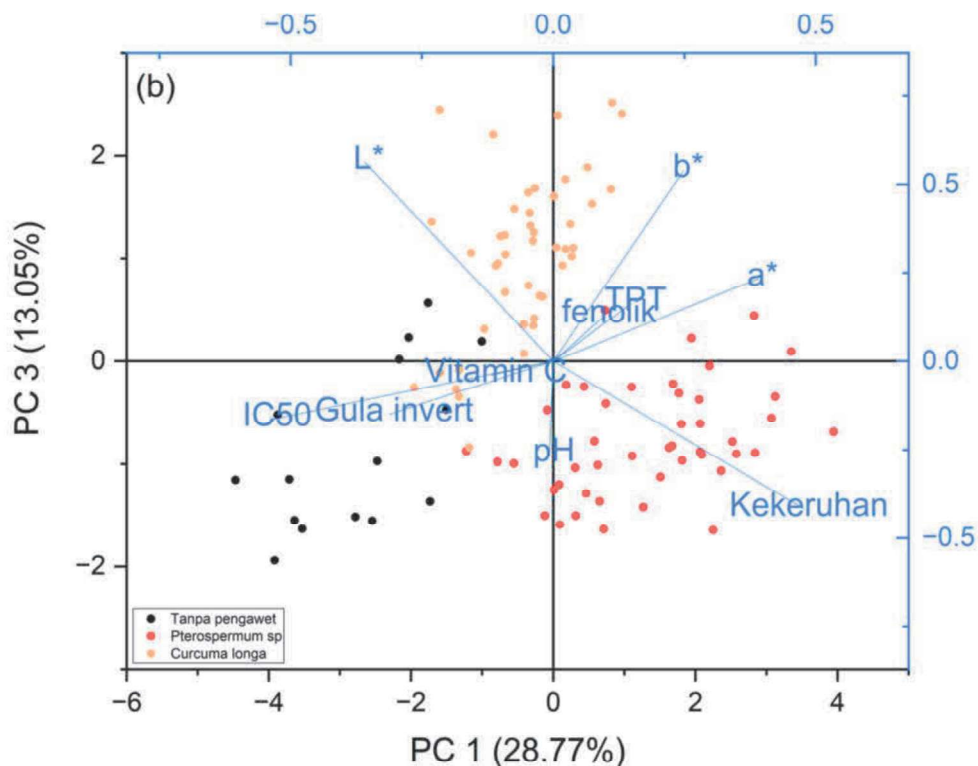
Tabel 2.9. Ringkasan variabel dominan pembentuk komponen utama (PCA) nira aren pada penyimpanan 0–4 jam (data distandarisasi z-score)

Komponen	Eigenvalue	Varians (%)	Kumulatif (%)	Variabel dominan (loading)
PC1	2,88	28,77	28,77	IC <sub>50</sub> (-0,534); kekeruhan (+0,478); a* (+0,390) (L -0,359
PC2	2,43	24,31	53,08	pH (+0,530); fenolik total (-0,520); vitamin C (+0,500)
PC3	1,31	13,05	66,13	L* (+0,563); b* (+0,540); kekeruhan (-0,417)
PC4	1,03	10,28	76,42	TPT (-0,844); a* (+0,438); vitamin C (+0,262)

Biplot penyimpanan 0-8 jam, PC1–PC2 dan PC1–PC3 (Gambar 2.23a–b), menunjukkan bahwa pemisahan sampel mengikuti struktur komponen yang dibentuk oleh variabel dominan. Pemisahan pada sumbu PC1 terutama searah dengan perubahan kombinasi kekeruhan dan gula invert yang berlawanan arah dengan pH, TPT, dan komponen warna (khususnya b\*). Sementara itu, sumbu PC2 memperlihatkan

pemisahan yang kuat pada dimensi kekeruhan– $a^*$  versus  $L^*$ . Pada ruang komponen ini, perlakuan tanpa pengawet menunjukkan deviasi skor yang paling nyata dibandingkan dua perlakuan pengawet, konsisten dengan kontribusi besar kekeruhan dan gula invert pada pembentukan sumbu utama. Sebaliknya, perlakuan *Curcuma longa* cenderung mempertahankan posisi skor lebih dekat ke pusat dan/atau pada arah yang tidak mengikuti dominasi vektor kekeruhan–gula invert, menunjukkan kestabilan relatif pada dimensi utama perubahan fisikokimia. Perlakuan *Pterospermum celebicum* membentuk pola pemisahan yang berbeda dan lebih menonjol pada dimensi yang memuat kekeruhan/warna (PC2), sejalan dengan dominasi kekeruhan dan  $a^*$  pada komponen tersebut. Secara temporal, pemisahan skor yang awalnya masih rapat pada jam 0–2 mulai berubah jelas pada rentang jam 3–4, ditunjukkan oleh pergeseran skor menjauh dari pusat biplot ke arah vektor kekeruhan dan gula invert (sesuai dominasi keduanya pada PC1 dan PC2; Tabel 2.6). Berdasarkan rerata skor per jam, centroid bergeser nyata pada rentang jam 3–4, ditunjukkan oleh penurunan PC1 dari 0,070 (jam 3) menjadi –0,440 (jam 4) setelah berada pada 0,593 (jam 2), sehingga mulai jam ke-3 dan semakin tegas pada jam ke-4 terjadi penyimpangan multivariat dari fase awal.

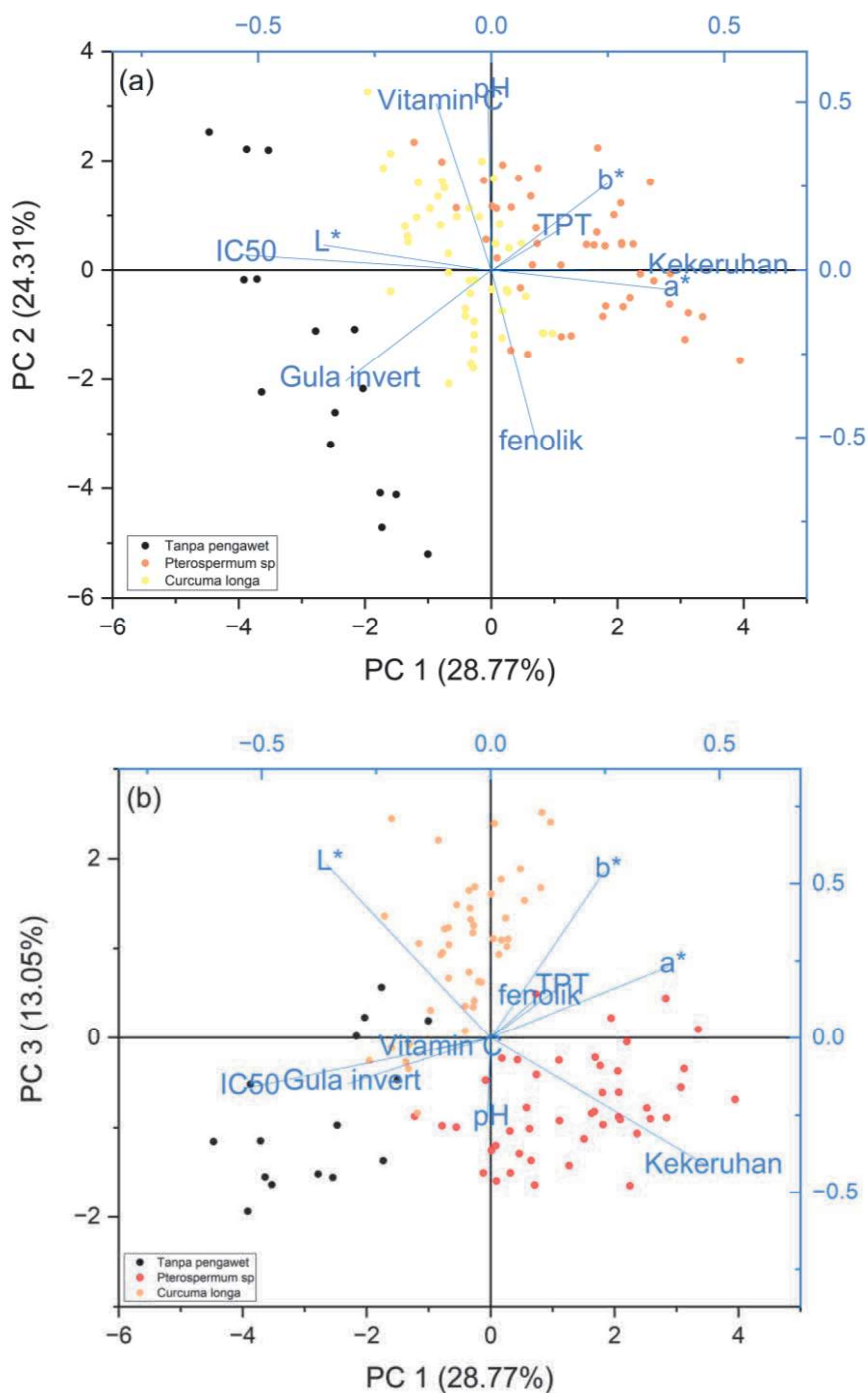


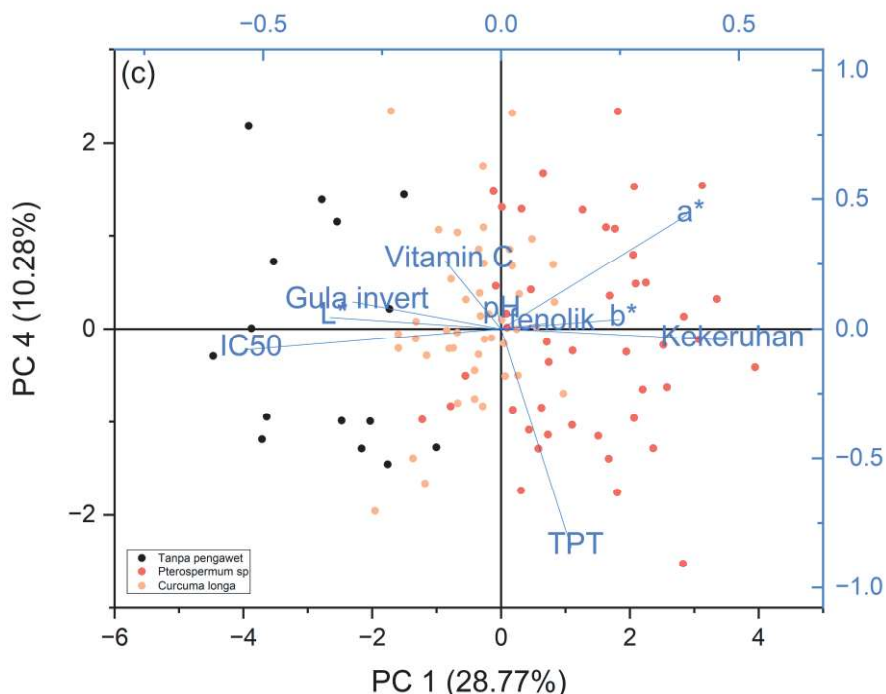


Gambar 2.23. Biplot Principal Component Analysis (PCA) nira aren; parameter fisikokimia dengan lama penyimpanan 8 jam. (a) Hubungan PC1 dan PC2, dan (b) hubungan PC 1 dan PC 3. Panjang dan arah vektor menggambarkan kontribusi variabel terhadap komponen utama, sedangkan kedekatan antar titik menunjukkan kemiripan karakteristik sampel.

Pengamatan pada interval 0–4 jam, biplot PCA (Gambar 2.24a–c) menunjukkan pemisahan sampel yang lebih cepat terbentuk ketika variabel bioaktif dimasukkan ke dalam struktur analisis. Pemisahan pada PC1–PC2 terutama mengikuti kombinasi variabel dominan, yaitu kekeruhan– $a^*$  bersama arah kontribusi  $IC_{50}$  pada PC1, serta dimensi kimia–bioaktif pada PC2 yang dibentuk oleh pH, fenolik total, dan vitamin C. Dengan struktur ini, kelompok tanpa pengawet menunjukkan penyimpangan skor yang paling jelas dari kelompok perlakuan pengawet, menandakan bahwa perubahan pada fase awal tidak hanya tampak pada parameter fisik, tetapi juga pada dimensi bioaktif. Perlakuan *Curcuma longa* cenderung berada lebih dekat ke pusat ruang komponen dan tidak secepat kontrol bergerak mengikuti arah dominasi variabel pembentuk PC1, sedangkan *Pterospermum celebicum* menunjukkan pola pemisahan yang khas pada kombinasi PC yang memuat kekeruhan/warna dan dimensi kimia–bioaktif. Selain itu, proyeksi pada PC1–PC4 menegaskan bahwa variasi TPT (sebagai variabel dominan pada PC4) merupakan dimensi tambahan yang berkontribusi pada pemisahan sampel pada interval awal penyimpanan. Pada interval 0–4 jam, deviasi multivariat mulai tampak pada jam ke-3 dan menjadi paling jelas pada jam ke-4, ketika skor sampel bergeser lebih

jauh mengikuti arah variabel dominan pada PC1–PC2 (kekeruhan dan a serta kontribusi  $IC_{50}$ ; Tabel 2.7). Pergeseran skor paling jelas muncul pada jam 3–4; centroid berubah dari  $(PC1, PC2) = (-0,042; -0,033)$  pada jam 2 menjadi  $(0,398; -0,941)$  pada jam 3 dan semakin jauh pada jam 4  $(0,731; -1,670)$ , menunjukkan deviasi multivariat yang menguat menjelang jam ke-4.





Gambar 2.24. Biplot Principal Component Analysis (PCA) nira aren; parameter fisikokimia dan kandungan bioaktif dengan lama penyimpanan 4 jam. (a) Hubungan PC1 dan PC2, (b) hubungan PC 1 dan PC 3, dan (c) hubungan PC 1 dan PC 4. Panjang dan arah vektor menggambarkan kontribusi variabel terhadap komponen utama, sedangkan kedekatan antar titik menunjukkan kemiripan karakteristik sampel.

Perbedaan pola orientasi skor antara sampel dengan *Curcuma longa* dan *Pterospermum sp.* menunjukkan mekanisme stabilisasi mutu yang berbeda. Penggunaan *Curcuma longa* mempertahankan posisi sampel tetap dekat pusat PCA pada kedua analisis, dengan kecenderungan bergerak ke arah positif PC2 yang berasosiasi dengan stabilitas pH dan vitamin C. Hal ini konsisten dengan kandungan kurkuminoid dan turmeron pada kunyit yang memiliki aktivitas antimikroba dan antioksidan kuat, sebagaimana dijelaskan oleh Gounder & Lingamallu (2012). Aktivitas ini menghambat oksidasi fenolik, memperlambat penurunan vitamin C, dan menjaga kejernihan nira, sehingga menjadikan *Curcuma longa* sebagai pengawet yang paling efektif untuk mempertahankan mutu nira segar hingga empat jam penyimpanan.

Sebaliknya, *Pterospermum sp.*, menunjukkan pola pergeseran yang berbeda. Sampel bergerak mendekati vektor pH dan TPT pada biplot PC1–PC2, yang menunjukkan bahwa polifenol *Pterospermum* lebih dominan menstabilkan pH dan total padatan terlarut melalui interaksi senyawa tanin-protein, meskipun meningkatkan kekeruhan akibat pembentukan flokulasi. Mekanisme ini membuat *Pterospermum* kurang sesuai untuk mempertahankan kejernihan nira segar, tetapi justru lebih relevan untuk

pengolahan gula aren, di mana kestabilan pH dan TPT lebih krusial dibanding kejernihan awal. Temuan ini mengindikasikan adanya dua jalur degradasi paralel pada nira aren, yaitu jalur fisikokimia yang ditandai oleh peningkatan kekeruhan, gula invert, dan perubahan warna, serta jalur bioaktif yang mencerminkan degradasi senyawa fenolik dan vitamin C serta peningkatan  $IC_{50}$ . Kedua jalur tersebut saling berhubungan melalui mekanisme redoks yang mempercepat pembentukan pigmen gelap dan penurunan kualitas sensorik.

Integrasi hasil PCA 0–8 jam dan 0–4 jam memperlihatkan pola yang konsisten dalam mengidentifikasi jam ke-4 sebagai titik kritis perubahan mutu nira aren. Pada titik ini, baik dimensi fisik, kimia, maupun bioaktif menunjukkan penyimpangan yang jelas dari pola stabil jam 0–3, menandai awal percepatan kerusakan. Konsistensi lintas-interval ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk menetapkan jam ke-4 sebagai batas kritis penanganan pascapanen nira aren dan sebagai acuan dalam menentukan efektivitas pengawet alami. Dengan demikian, hasil PCA tidak hanya memvalidasi hubungan antarparameter yang teridentifikasi melalui uji korelasi, tetapi juga memperkuat pemahaman mekanistik bahwa jenis pengawet alami menentukan jalur dominan penurunan mutu nira, apakah bersifat fisik (flokulasi dan kekeruhan) atau kimia (oksidasi dan penurunan antioksidan). Temuan ini memberikan dasar ilmiah penting bagi pengembangan sistem preservasi alami berbasis fitokimia untuk produk nira dan minuman fungsional sejenis. Secara praktis, hasil ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengembangan sistem preservasi alami berbasis fitokimia pada produk nira dan minuman fungsional sejenis. Dalam konteks aplikasi, *C. longa* lebih sesuai digunakan pada nira segar yang mensyaratkan kualitas visual tinggi (kejernihan dan warna cerah), misalnya untuk konsumsi langsung sebagai minuman tradisional. Sebaliknya, *P. celebicum* lebih direkomendasikan untuk nira yang akan diolah lebih lanjut menjadi gula aren atau produk turunannya, di mana parameter utama adalah kestabilan pH dan TPT, sedangkan kekeruhan awal tidak menjadi faktor penentu mutu. Dengan demikian, PCA tidak hanya memvalidasi hubungan antarparameter yang teridentifikasi melalui uji korelasi dan GLM, tetapi juga memperkuat pemahaman mekanistik mengenai bagaimana pengawet berbasis fitokimia mengarahkan jalur degradasi mutu nira aren.

#### 2.4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan dua pengawet alami, yaitu akar kayu bayur (*Pterospermum celebicum*) dan rimpang kunyit (*Curcuma longa*), berpengaruh terhadap stabilitas fisikokimia dan bioaktif nira aren selama penyimpanan. Analisis General Linear Model (GLM) mengonfirmasi bahwa kombinasi jenis pengawet, konsentrasi, dan lama penyimpanan memberikan pengaruh signifikan terhadap pH, kekeruhan, total padatan terlarut, gula invert, dan atribut warna. Analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa penurunan perubahan kualitas nira aren berkaitan erat antara perubahan pH peningkatan kekeruhan dan gula invert, yang mencerminkan progresi fermentasi spontan selama penyimpanan.

Analisis Principal Component Analysis (PCA) mengungkapkan dua dimensi utama perubahan mutu, yaitu dimensi fisikokimia yang ditandai oleh peningkatan kekeruhan, perubahan warna, dan hidrolisis gula, serta dimensi bioaktif yang mencerminkan penurunan vitamin C dan kapasitas antioksidan. PCA secara konsisten

menunjukkan bahwa jam ke-4 merupakan titik kritis perubahan mutu nira aren, karena pada jam ini sampel mulai berpindah dari kluster stabil menuju arah variabel kerusakan, menandai awal percepatan degradasi. *Curcuma longa* terbukti paling efektif mempertahankan kejernihan, stabilitas warna, pH, dan vitamin C selama empat jam penyimpanan, sedangkan *Pterospermum celebicum* lebih dominan menstabilkan pH dan TSS meskipun meningkatkan kekeruhan.

Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa *Curcuma longa* lebih sesuai digunakan sebagai pengawet alami untuk nira konsumsi segar, sementara *Pterospermum celebicum* lebih tepat untuk pengolahan gula aren yang menuntut kestabilan pH dan TSS sebelum pemanasan. Dengan demikian, pemilihan pengawet alami pada nira aren sebaiknya disesuaikan dengan tujuan akhir penggunaan produk, dan penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan strategi preservasi berbasis fitokimia lokal yang aman dan berkelanjutan.