E-ISSN: 2579-4523
JURNAL TEKNOLOGI DAN INDUSTRI PANGAN UNISRI
http://ejurnal.unisri.ac.id/index.php/jtpr/index
Terakreditasi sinta 3 sesuai dengan SK No. 152/E/KPT/2023 tanggal 25 September 2023
https://sinta.kemdiktisaintek.go.id/journals/profile/7556

Physicochemical characteristics of smart edible packaging based on butterfly pea flower extract, gum arabic, and eggshell powder at different beeswax concentrations

Karakteristik Fisikokimia Smart Edible Packaging Berbasis Ekstrak Bunga Telang, Gom Arab, dan Tepung Cangkang Telur pada Berbagai Konsentrasi Lilin Lebah

Nathaniela Easter Serullo[1], Erni Setijawaty[1], Rachel Meiliawati Yoshari[1], Ignasius Radix AP Jati[1*]

[1]Prodi Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya
*Corresponding author: radix@ukwms.ac.id

Article info

Keywords: smart edible packaging; beeswax; gum arabic; WVTR

Abstract

Smart edible packaging is a consumable packaging system that extends product shelf life while indicating changes in product quality. Gum arabic-based edible films exhibit a high water vapor transmission rate (WVTR); therefore, beeswax was incorporated to reduce moisture permeability. In this study, smart edible packaging was formulated from butterfly pea flower extract, gum arabic, and chicken eggshell powder with the addition of beeswax. This study aimed to investigate the effect of beeswax concentration on the characteristics of the smart edible packaging. The experiment employed a Randomized Block Design (RBD) with a single factor, namely beeswax concentration at six levels (0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1% w/v). The parameters evaluated were tensile strength, elongation, WVTR, total phenol, antioxidant activity, and the performance of the packaging for steamed chicken meat during three days of storage. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA, α = 5%), followed by Duncan's Multiple Range Test (DMRT, α = 5%). Increasing beeswax concentration increased elongation (42.68–52.98%), total phenol content (897.78–994.89 mg GAE/100 g sample), and antioxidant activity (65.54–92.24% RSA), whereas it decreased tensile strength (from 0.14 to 0.05 N/mm²) and WVTR (from 89.23 to 64.42 g/m²/day). Higher beeswax concentrations also inhibited the deterioration of steamed chicken meat, as indicated by lower pH values and lower browning intensity. Furthermore, the smart edible packaging effectively indicated quality changes in steamed chicken meat through a color shift from blue to green over three days of storage.

PENDAHULUAN

Kemasan pangan berperan besar dalam melindungi produk yang dikemas dari bahaya fisik, kimia, dan mikrobiologis sehingga dapat memperpanjang umur simpan (Abdulla et al., 2024). Inovasi-inovasi baru terkait pengembangan kemasan yang ramah lingkungan dan bersifat *biodegradable* mulai bermunculan. Kemasan *biodegradable* merupakan kemasan yang mudah terurai pada kondisi dan waktu tertentu yang dipengaruhi oleh mikroorganisme baik di tanah maupun di perairan (Amin et al., 2022).

Edible film termasuk dalam jenis kemasan *biodegradable* yang aman untuk dikonsumsi dan dapat dijadikan sebagai bahan pengemas makanan (*edible packaging*). Komponen yang

https://doi.org/10.33061/jitipari.v12i1.14221
Received March 16, 2026; revised October 16, 2026; accepted October 30, 2026; published November 08, 2026.
Copyright ©2026 the authors. Published by Universitas Slamet Riyadi Surakarta. This is an open acces article under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

umum digunakan dalam pembuatan *edible film* yaitu hidrokoloid (polisakarida, protein) dan lipid. Salah satu jenis polisakarida yang mampu membentuk film adalah gom arab. Gom arab merupakan hidrokoloid polisakarida kompleks yang terdiri atas L-arabinosa, L-rhamnosa, D-galaktosa, asam D-glukuronat, dan protein (Adam et al., 2022). Gom arab tidak mudah terdegradasi oleh enzim, stabil pada kondisi asam dan basa, serta mudah larut dalam air dingin maupun panas dibandingkan jenis hidrokoloid lainnya (Oredokun-Lache et al., 2024).

Smart edible packaging memerlukan bahan aktif yang mampu secara aktif memperpanjang umur simpan, serta dapat memberikan informasi perubahan mutu bahan pangan yang dikemas (Jati et al., 2024). Penambahan bahan aktif dalam penelitian ini yaitu ekstrak bunga telang. Ekstrak bunga telang (*Clitoria ternatea L.*) mengandung pigmen antosianin yang mampu berperan sebagai antioksidan dan sensitif terhadap perubahan pH sehingga menyebabkan perubahan warna pada *film*. Penambahan tepung cangkang telur ayam yang berperan sebagai bahan pengisi (*filler*) dapat memperkecil pori-pori *film* dan menambah ketebalan *film* sehingga lebih resisten terhadap oksigen dan uap air (Vonnie et al., 2022).

Edible film memiliki laju transmisi dan permeabilitas terhadap uap air yang tinggi. Penambahan komponen hidrofobik pada *edible film* diketahui dapat menurunkan permeabilitas dan laju transmisi terhadap uap air (Ermawati & Rahmadhia, 2023). Salah satu komponen hidrofobik yang dapat digunakan adalah lilin lebah. Lilin lebah (*beeswax*) mengandung senyawa alkana, asam lemak bebas, monoester, diester, hidroksi monoester, hidroksi diester, dan alkohol lemak (Indriyati et al., 2020), dapat membentuk lapisan padat pada suhu ruang, dan resisten terhadap pergerakan uap air dalam suatu sistem (Betancur-D'Ambrosio et al., 2024). Lilin lebah mengandung senyawa fenol yang mampu berperan sebagai antioksidan (Sawicki et al., 2022). Lilin lebah juga mengandung β-karoten yang berfungsi sebagai antioksidan (Kurek-Górecka et al., 2020).

Penelitian pemanfaatan lilin lebah untuk edible film sangat terbatas. Belum pernah dilaporkan penelitian *smart edible packaging* berbasis gom arab yang menggunakan lilin lebah untuk menurunkan permeabilitas terhadap uap air. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi karakteristik fisikokimia *smart edible packaging* berbasis ekstrak bunga telang, gom arab dan tepung cangkang telur pada berbagai konsentrasi lilin lebah.

METODE PENELITIAN

Alat

Alat yang digunakan dalam pembuatan *smart edible packaging* terdiri dari timbangan analitis PA214 (Ohaus, Amerika Serikat), termometer, ayakan 60 *mesh*, cetakan *film* (silikon berukuran 10 cm x 10 cm x 0,012 cm), *stopwatch*, spektrofotometer UV-Vis 1800 (Shimadzu, Jepang), *vortex* (Thermolyne, Amerika Serikat), dan mikropipet (Eppendorf, Jerman).

Alat yang digunakan untuk analisis *smart edible packaging* terdiri dari *texture analyzer* TA-XT plus (Stable Micro Systems, Inggris), spektrofotometer UV-Vis 1800 (Shimadzu, Jepang), *shaking waterbath* (Daihan Labtech, Korea Selatan), timbangan analitis PA214 (Ohaus, Amerika Serikat), pH meter (Ohaus, Amerika Serikat), *color reader* CR-10 (Konica Minolta, Jepang), *vortex* (Thermolyne, Amerika Serikat), oven (Binder, Jerman), *refrigerator* (Samsung, Korea Selatan), *hygrometer* (Krisbow, Indonesia), *chopper* (Philips, Belanda), mikropipet (Eppendorf, Jerman), dan mikrometer sekrup.

Bahan

Gom arab, sorbitol, dan lilin lebah *food grade*, bunga telang serta daging ayam negeri dari Kota Surabaya, cangkang telur ayam diperoleh dari Sidoarjo, Jawa Timur, Tween 80 (Sigma Chemical), asam asetat (Fluka, CAS 64-19-7), KCl (Emsure, CAS 7447-40-7), HCl (Honeywell, CAS 7647-01-0), Na-asetat (Merck, CAS 127-09-3), asam galat (Sigma Aldrich, CAS 149-91-7), Na_2CO_3 (Merck, CAS 497-19-8), reagen Folin–Ciocalteu (Merck, CAS 12111-13-6), metanol (Emsure, CAS 67-56-1), *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl*/DPPH (Sigma Aldrich, CAS 1898-66-4).

Produksi *smart edible packaging*

Pembuatan *smart edible packaging* diawali dengan pencampuran ekstrak bunga telang, gom arab 1%, tepung cangkang telur ayam 0,3%, sorbitol 1%, Tween 80 0,5%, dan lilin lebah. Ekstrak bunga telang diperoleh dari bunga telang kering yang dikecilkan ukurannya, kemudian diayak 60 mesh, dan ditimbang. Air dipanaskan hingga mencapai suhu 80°C dan diukur volumenya. Ekstraksi dilakukan dengan mencampurkan bunga telang kering dan air pada rasio 1:50 (b/v). Campuran tersebut diekstraksi selama 30 menit dan disaring. Filtrat yang diperoleh digunakan sebagai ekstrak bunga telang untuk tahap penelitian selanjutnya. Sementara, cangkang telur dicuci menggunakan air mengalir untuk menghilangkan kotoran. Cangkang telur yang telah bersih kemudian dikeringkan menggunakan cabinet dryer pada suhu 60°C. Selanjutnya, cangkang telur kering dihancurkan menggunakan alat penghalus hingga diperoleh partikel berukuran kecil. Hasil penghancuran kemudian diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh untuk memperoleh tepung cangkang telur dengan ukuran partikel yang relatif seragam. Campuran seluruh bahan kemudian dipanaskan hingga suhu 80°C disertai pengadukan. Cetakan silikon disiapkan dan larutan dituang sebanyak 80 mL secara merata. Hasil pencetakan kemudian dikeringanginkan pada suhu 18±2°C dan RH 55±5% selama ±42 jam untuk menghasilkan lembaran *edible film* yang kering dan dapat dilepas dari cetakan dengan mudah.

Analisis Kuat Tarik

Pengujian yang dilakukan menggunakan metode ASTM D882-02 (Gregory et al., 2024) dengan ketebalan sampel kurang dari 1 mm. Pengukuran kuat tarik menggunakan *texture analyzer* (TA-XT plus) dengan pengaturan yaitu mode *measure force in tension*, opsi *return to start*, *test speed* sebesar 8,3 mm/s, *post-test speed* sebesar 10 mm/s, *target mode distance*, *distance* sebesar 200 mm, *trigger type button*, dan *data acquisition rate* sebesar 500 pps. Hasil kuat tarik dinyatakan dalam satuan MPa atau N/mm².

$$\text{Kuat tarik}\left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right) = \frac{\text{Gaya (N)}}{\text{Luas penampang (mm}^2\text{)}}$$

Analisis Persen Pemanjangan

Pengujian yang dilakukan menggunakan metode ASTM D882-02 (Gregory et al., 2024) dengan ketebalan sampel kurang dari 1 mm. Pengukuran persen pemanjangan menggunakan *texture analyzer* dengan pengaturan yaitu mode *measure force in tension*, opsi *return to start*, *test speed* sebesar 8,3 mm/s, *post-test speed* sebesar 10 mm/s, *target mode distance*, *distance*

sebesar 200 mm, *trigger type button*, dan *data acquisition rate* sebesar 500 pps. Hasil dinyatakan dalam persen dengan perhitungan berikut:

$$Elongation\ (\%) = \frac{\text{Penambahan panjang sampel (mm)}}{\text{Panjang awal sampel (mm)}} \times 100\%$$

Analisis *Water Vapor Transmission Rate* (WVTR)

Pengujian WVTR mengacu pada standar ASTM E96-00 (Jati et al., 2024) dengan metode gravimetri yang menggunakan silika gel untuk menyerap uap air yang terdifusi melalui *film* pada kondisi lingkungan yang terkontrol dengan larutan garam jenuh siap pakai dengan RH 75% dan suhu 27±3°C. Diameter mulut gelas sloki diukur dan gelas kosong ditimbang secara analitis. Sampel *smart edible packaging* dipotong sesuai diameter tersebut, sementara silika gel (10 g) dikeringkan di oven hingga berwarna biru dan dimasukkan ke gelas sloki. Sampel direkatkan pada mulut gelas, lalu ditempatkan dalam desikator berisi larutan garam jenuh (RH 75%, 27±3°C). Setiap hari selama 4 hari, lembaran dilepas dan gelas ditimbang untuk menentukan penambahan berat silika gel, diikuti pembuatan persamaan regresi linier guna menghitung WVTR dengan rumus:

$$\text{WVTR} = \frac{\text{slope kenaikan berat silika gel } (\frac{\text{gram}}{\text{hari}})}{\text{luas permukaan mulut gelas sloki } (\text{m}^2)}$$

Ekstraksi Sampel *Smart Edible Packaging*

Sampel *smart edible packaging* dipotong menjadi ukuran kecil, kemudian 1 g ditimbang pada gelas beker menggunakan timbangan analitis. Ditambahkan 30 mL metanol, gelas ditutup dengan aluminium foil, dan diekstrak dalam *shaking waterbath* selama 1 jam pada suhu 60°C dan kecepatan 100 rpm. Ekstrak disaring menggunakan corong dan kertas saring ke dalam erlenmeyer, volumenya diukur dengan gelas ukur, dipindahkan ke botol coklat, serta disimpan di *refrigerator* hingga digunakan untuk pengujian total fenol dan aktivitas antioksidan.

Analisis Total Fenol

Tahap analisis total fenol yaitu larutan standar asam galat 1000 ppm dibuat dengan melarutkan 0,0100 g asam galat dalam akuades hingga volume 10 mL, sedangkan larutan Na_2CO_3 2% dibuat dengan melarutkan 2,0000 g Na_2CO_3 dalam akuades hingga 100 mL. Kurva standar disiapkan dari pengenceran larutan asam galat (0–1,0 mL) dalam labu takar 10 mL, kemudian masing-masing 1 mL direaksikan dengan 0,5 mL reagen Folin–Ciocalteu, didiamkan 8 menit dalam gelap, ditambahkan 4,5 mL Na_2CO_3 2%, diinkubasi 1 jam dalam gelap, dan diukur absorbansinya pada 765 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk memperoleh persamaan regresi linear. Prosedur yang sama diterapkan pada sampel, dan kadar total fenol dihitung berdasarkan persamaan kurva standar asam galat.

$$TPC\left(\frac{mg\ GAE}{100\ g\ sampel}\right) = \frac{total\ fenol\ (ppm)}{1000\ mL} \times \frac{V\ sampel\ (mL)}{m\ sampel\ (g)} \times FP \times 100$$

Uji Antioksidan

Uji aktivitas antioksidan pada *smart edible packaging* dilakukan menggunakan metode *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH) (Jati et al., 2022). Sampel yang telah bereaksi dengan

DPPH diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 517 nm dan hasil dinyatakan dalam %RSA (*Radical Scavenging Activity*). %RSA menunjukkan persentase radikal bebas yang dapat dihambat atau dinetralkan oleh sampel. Analisis aktivitas antioksidan diawali dengan pembuatan larutan DPPH 0,1 mM dengan melarutkan 0,0010 g DPPH dalam 25 mL metanol. Absorbansi sampel diukur dengan mencampur 0,25 mL sampel, 0,5 mL DPPH, dan 4 mL metanol, vortex (2000 rpm, 10 detik), inkubasi gelap 30 menit, lalu spektrofotometri UV-Vis pada 517 nm. RSA dihitung menggunakan rumus standar.

$$\text{RSA}\ (\%) = \frac{(\text{Abs. DPPH (kontrol)} - \text{Abs. sampel})}{\text{Abs. DPPH (kontrol)}} \times 100\%$$

Pengujian Warna *Smart Edible Packaging*, Warna, dan pH Daging Ayam Kukus

Daging ayam dada dipotong 2×2 cm, dikukus 10 menit, ditiriskan, dan didinginkan. Daging diletakkan dalam *cup* plastik dengan *smart edible packaging* direkatkan pada mulutnya menggunakan lem, lalu disimpan suhu ruang selama 72 jam. Setiap 24 jam, warna lembar *smart edible packaging* diukur dengan *color reader* (L*, a*, b*, C, h°), warna daging diamati secara langsung secara visual dan diberikan intensitas (+), dan pH daging diuji setelah dihaluskan (rasio 1:2 b/v dengan akuades), disaring, serta diukur dengan pH meter.

Analisis Data

Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktor tunggal dengan jumlah taraf perlakuan konsentrasi lilin lebah dalam percobaan sebanyak enam, yaitu 0% (T1); 0,2% (T2); 0,4% (T3); 0,6% (T4); 0,8% (T5); dan 1% (T6) (b/v) dan pengulangan sebanyak empat kali sehingga didapatkan 24 unit eksperimen. Analisis dengan uji ANOVA (*Analysis of Variance*) α=5% dilanjutkan dengan uji DMRT (*Duncan's Multiple Range Test*) α=5% untuk menentukan perlakuan yang berbeda nyata.

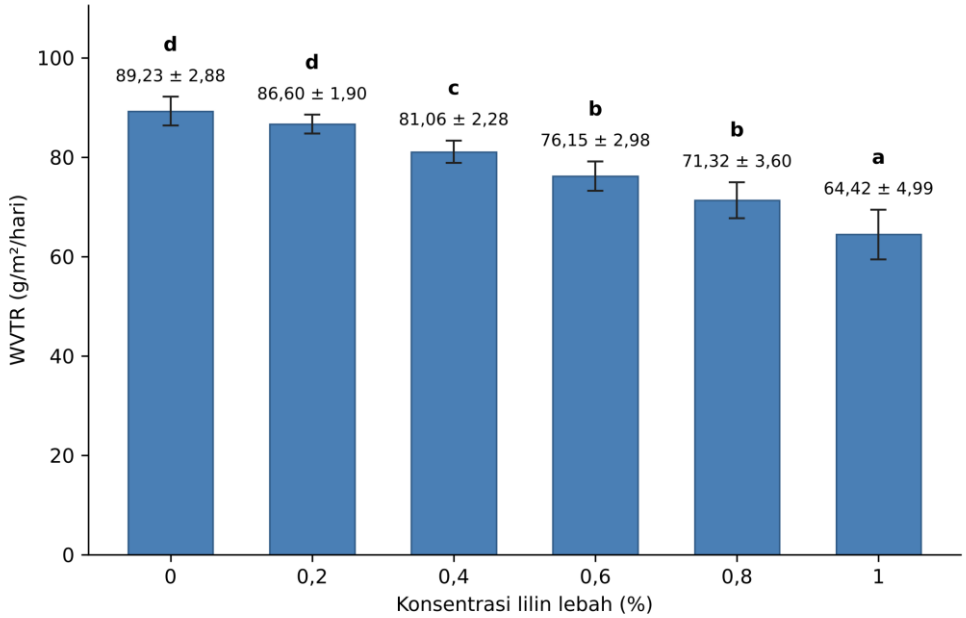
HASIL DAN PEMBAHASAN

Water Vapor Transmission Rate* (WVTR) *Smart Edible Packaging

Gambar 1 menunjukkan bahwa nilai WVTR berkisar antara 64,42–89,23 g/m²/hari dengan nilai tertinggi pada perlakuan T1 (konsentrasi lilin lebah 0%) dan nilai terendah terdapat pada perlakuan T6 (konsentrasi lilin lebah 1%). Berdasarkan uji ANOVA (α=5%), konsentrasi lilin lebah berpengaruh nyata terhadap WVTR *smart edible packaging*. Namun, penambahan lilin lebah 0,2% belum menghasilkan WVTR yang berbeda nyata dibandingkan kontrol (0%). Hal tersebut diduga karena jumlah lilin lebah yang masih sedikit hanya membentuk lapisan kristal padat yang sangat tipis, sehingga belum cukup efektif menghambat laju transmisi uap air.

Seiring meningkatnya konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan, maka semakin rendah nilai WVTR *smart edible packaging* berbasis ekstrak bunga telang, gom arab, dan tepung cangkang telur ayam. Hal tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ermawati & Rahmadhia (2023), bahwa penambahan lilin lebah dengan konsentrasi 0,5% dan 1% pada *edible film* berbasis pati sukun dapat menurunkan nilai WVTR secara berturut-turut menjadi 7,268 dan 7,211 g/m²/hari, sedangkan tanpa penambahan lilin lebah diperoleh nilai WVTR sebesar 10,886 g/m²/hari. Hasil yang diperoleh juga menunjukkan nilai WVTR yang lebih

rendah dibandingkan penelitian terdahulu sebesar 314,34 g/m²/hari untuk *smart edible packaging* berbasis konjac, ekstrak bunga telang, dan tepung cangkang telur ayam (Santoso et al., 2024).



Keterangan: Notasi yang berbeda pada rata-rata menunjukkan adanya perbedaan nyata pada uji DMRT (α=5%)

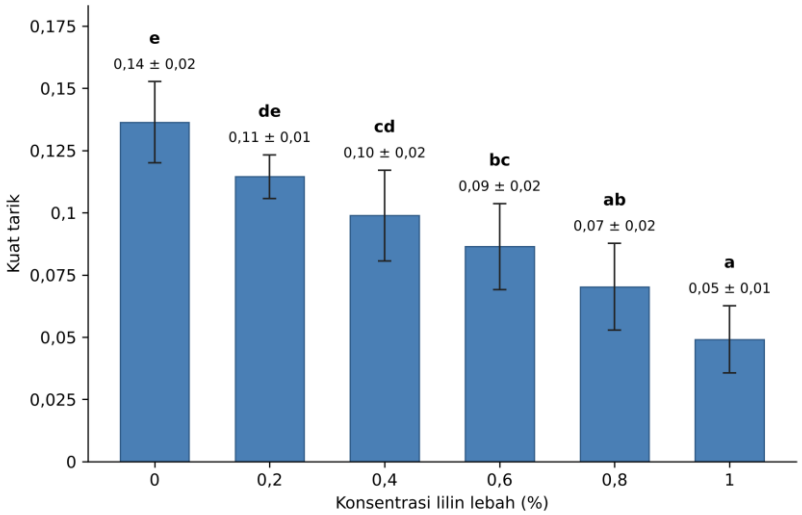
Gambar 1. WVTR *smart edible packaging* pada berbagai konsentrasi lilin lebah

Menurut Oko et al. (2023), penambahan lilin lebah dalam *edible film* berbasis beras merah membentuk lapisan padat yang bersifat hidrofobik dan meningkatkan ketebalan. Bertambahnya ketebalan *smart edible packaging* seiring penambahan konsentrasi lilin lebah menyebabkan semakin buram atau berkurangnya transparansi dari *smart edible packaging*. Lilin lebah juga memiliki sifat hidrofobik yang dapat menahan laju transmisi uap air *edible film*. Lilin lebah dapat membentuk kristal padat yang berfungsi sebagai *barrier* terhadap uap air *edible film*.

Kuat Tarik *Smart Edible Packaging*

Hasil penelitian menunjukkan nilai kuat tarik *smart edible packaging* berkisar antara 0,05–0,14 N/mm² (Gambar 2). Penambahan lilin lebah diketahui dapat memengaruhi nilai kuat tarik *smart edible packaging*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan, maka semakin rendah nilai kuat tarik *smart edible packaging*. Hasil yang diperoleh sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Li et al. (2019), bahwa nilai kuat tarik *film* berbasis isolat protein kedelai dan gom arab dengan penambahan lilin lebah (1,49–3,79 MPa) lebih rendah dibandingkan tanpa penambahan lilin lebah (5,82 MPa). Kuat tarik smart edible packaging yang dihasilkan (0,05–0,14 N/mm²) masih di bawah standar JIS Z 1707, yaitu minimal 0,392 N/mm² (Japanese Industrial Standard, 1975). Hal ini terutama disebabkan oleh gom arab yang memiliki struktur sangat bercabang dan kompak dengan viskositas rendah (Goycoolea et al., 1995), sehingga jaringan film yang terbentuk relatif lemah.

Penambahan lilin lebah yang bersifat hidrofobik juga mengganggu kontinuitas matriks polisakarida, sehingga kuat tarik menurun seiring peningkatan konsentrasinya. Penurunan ini merupakan konsekuensi dari tujuan menurunkan laju transmisi uap air, sebagaimana juga dilaporkan oleh Cecchini et al. (2017) dan Santoso (2006). Meskipun demikian, fungsi utama kemasan ini masih dapat dipertahankan yaitu sebagai pembungkus primer sekaligus indikator mutu daging ayam kukus.



Keterangan: Notasi yang berbeda pada rata-rata menunjukkan adanya perbedaan nyata pada uji DMRT (α=5%)

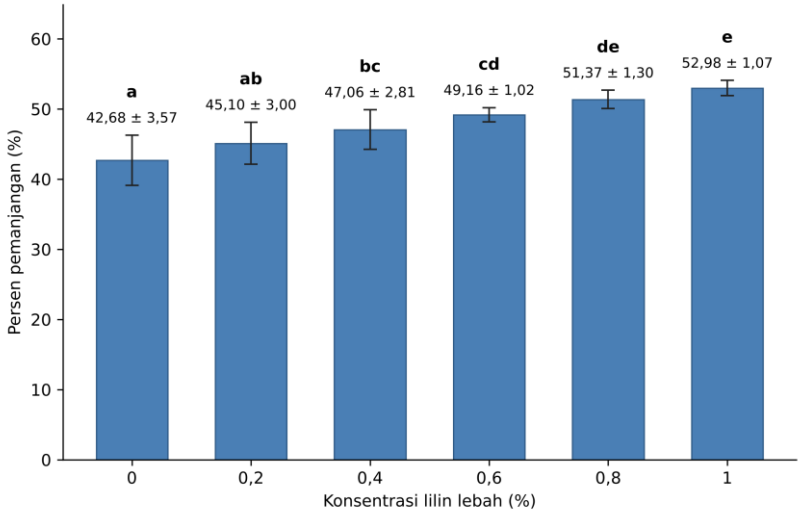
Gambar 2. Kuat tarik *smart edible packaging* pada berbagai konsentrasi lilin lebah

Menurut Nabila et al. (2018), nilai kuat tarik dapat dipengaruhi oleh komponen hidrofobik yaitu lilin lebah yang ditambahkan dalam pembuatan *edible film*. Lilin lebah dapat membentuk ikatan hidrogen dengan hidrokoloid menggantikan ikatan antar molekul hidrokoloid sehingga seiring dengan penambahan konsentrasi lilin lebah mengakibatkan diskontinuitas matriks *film*, meningkatkan jarak antara ikatan polimer, dan menurunkan sifat kohesi *film*. Sejalan dengan yang dilaporkan oleh Cortés-Rodríguez et al. (2020), lilin lebah merupakan lipid yang tidak larut dalam air pada saat pembuatan *film* sehingga terjadi pengikatan antar polimer hidrokoloid yang tidak terbentuk dengan baik, melemahkan matriks *film*, dan menurunkan nilai kuat tariknya.

Persen Pemanjangan *Smart Edible Packaging*

Hasil pengujian persen pemanjangan *smart edible packaging* berbasis ekstrak bunga telang, gom arab, dan tepung cangkang telur ayam berkisar antara 42,68–52,98%. Hasil pengujian persen pemanjangan disajikan pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan semakin tinggi konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan, maka semakin tinggi nilai persen pemanjangan *smart edible packaging* berbasis ekstrak bunga telang, gom arab, dan tepung cangkang telur ayam. Kehadiran lilin lebah dalam matriks *film* memengaruhi pembentukan ikatan hidrogen. Menurut Nabila et al. (2018), penambahan lilin lebah dapat menurunkan ikatan kohesi antar polimer dan gaya intermolekular sehingga dapat merenggangkan jarak antar molekul menghasilkan *edible film* yang memiliki elastisitas dan fleksibilitas yang tinggi. Lilin

lebah mampu membentuk ikatan hidrogen dengan hidrokoloid menggantikan ikatan antar molekul hidrokoloid. Peningkatan konsentrasi lilin lebah dapat menyebabkan peningkatan nilai persen pemanjangan.



Keterangan: Notasi yang berbeda pada rata-rata menunjukkan adanya perbedaan nyata pada uji DMRT (α=5%)

Gambar 3. Persen pemanjangan *smart edible packaging* pada berbagai konsentrasi lilin lebah

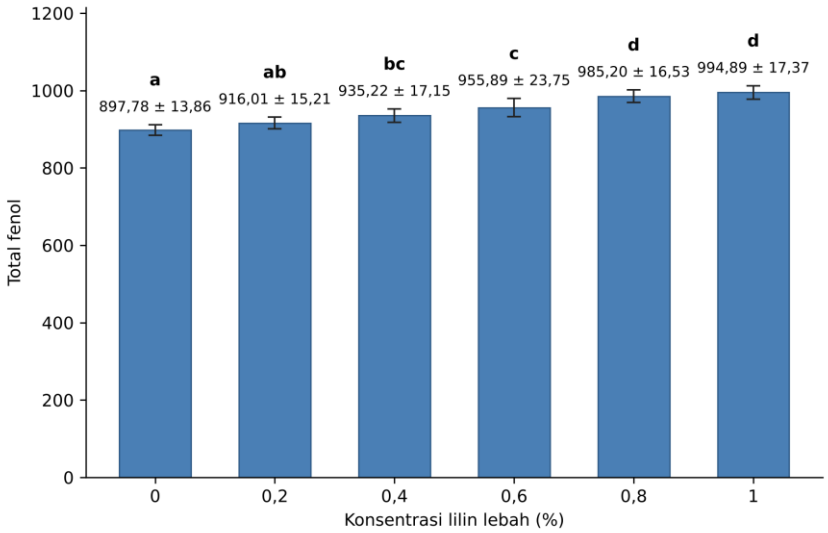
Total Fenol *Smart Edible Packaging*

Gambar 4 menunjukkan bahwa total fenol tertinggi pada perlakuan T6 (konsentrasi lilin lebah 1%), sedangkan nilai terendah terdapat pada perlakuan T1 (konsentrasi lilin lebah 0%). Total fenol *smart edible packaging* berbanding lurus dengan konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan. Semakin tinggi konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan, maka semakin tinggi total fenol *smart edible packaging*. Hal ini disebabkan penambahan lilin lebah mengandung senyawa fenolik yang berkontribusi dalam peningkatan total fenol.

Menurut Sawicki et al. (2022), lilin lebah memiliki nilai total fenol sebesar 0,71 mg GAE/g. Senyawa fenol yang terkandung dalam lilin lebah yaitu *caffeoylquinic acid* sebesar 1,9 µg/g; kaempferol sebesar 6 µg/g; *protocatechuic acid-O-hexoside* sebesar 3,4 µg/g; pinobanksin sebesar 85,7 µg/g; dan apigenin sebesar 3 µg/g. Perbedaan nilai total fenol lilin lebah dapat bervariasi tergantung pada faktor lingkungan, spesies lebah, dan cara pengolahan.

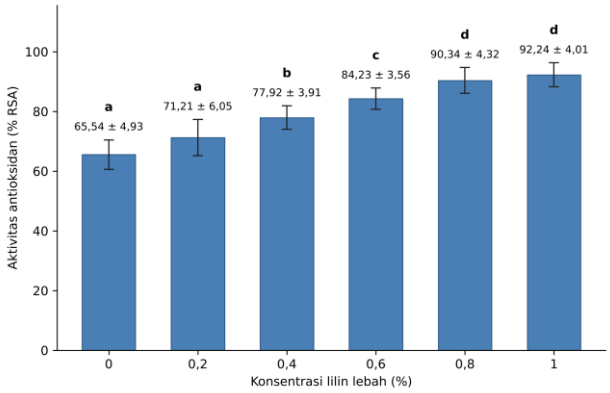
Aktivitas Antioksidan *Smart Edible Packaging*

Hasil pengujian aktivitas antioksidan terhadap *smart edible packaging* berbasis ekstrak bunga telang, gom arab, dan tepung cangkang telur ayam menggunakan metode DPPH dengan berbagai perlakuan menunjukkan nilai yang berkisar antara 65,54–92,24%RSA. Hasil pengujian aktivitas antioksidan dapat dilihat pada Gambar 5.



Keterangan: Notasi yang berbeda pada rata-rata menunjukkan adanya perbedaan nyata pada uji DMRT (α=5%)

Gambar 4. Total fenol *smart edible packaging* pada berbagai konsentrasi lilin lebah



Keterangan: Notasi yang berbeda pada rata-rata menunjukkan adanya perbedaan nyata pada uji DMRT (α=5%)

Gambar 5. Aktivitas antioksidan *smart edible packaging* pada berbagai konsentrasi lilin lebah

Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan, maka semakin tinggi aktivitas antioksidan *smart edible packaging*. Menurut Huri & Nisa (2014), nilai aktivitas antioksidan berkaitan dengan senyawa fenol yang terdapat dalam *edible film*. Total fenol dari *smart edible packaging* yang tinggi akan menghasilkan aktivitas antioksidan yang semakin tinggi. Senyawa fenol mampu berperan sebagai antioksidan dengan mengikat radikal bebas dan mendonorkan atom hidrogen dari gugus hidroksilnya melalui proses transfer elektron membentuk radikal fenoksil yang stabil. Hasil penelitian sejalan dengan yang dilakukan oleh Liu et al. (2021), dalam pembuatan *edible film* berbasis konjac dan penambahan *thyme oil* yang mengandung beberapa senyawa fenolik dapat meningkatkan aktivitas antioksidan. Penambahan minyak kelapa yang mengandung senyawa polifenol

dengan jumlah yang kecil dapat meningkatkan aktivitas antioksidan *film* berbasis pati kentang. Selain senyawa fenol, lilin lebah diketahui mengandung β-karoten (Kurek-Górecka et al., 2020).

Perubahan Warna dan pH Sampel Daging Ayam Kukus Selama Penyimpanan

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, daging ayam kukus memiliki ciri-ciri berwarna putih dan pH sebesar 6,22 pada penyimpanan hari ke-0. Seiring lamanya waktu penyimpanan, daging ayam kukus menunjukkan penurunan kualitas. Hal ini ditandai dengan perubahan warna ayam menjadi warna coklat. Perubahan warna yang terjadi diduga diakibatkan adanya aktivitas mikroba selama penyimpanan. Mikroba dapat menguraikan glikogen menghasilkan glukosa yang merupakan gula reduksi, serta mampu mendegradasi protein menjadi asam amino (Dawa, 2021). Selain itu, oksidasi lemak juga dapat berperan dalam perubahan warna daging ayam kukus menjadi kecoklatan.

Tabel 1. Perubahan warna daging ayam kukus selama penyimpanan

Penyimpanan Hari Ke-	Konsentrasi Lilin Lebah (b/v)					
	0%	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1%
0	Putih	Putih	Putih	Putih	Putih	Putih
1	Coklat (+1)	Coklat (+1)	Putih	Putih	Putih	Putih
2	Coklat (+2)	Coklat (+2)	Coklat (+2)	Coklat (+1)	Coklat (+1)	Coklat (+1)
3	Coklat (+4)	Coklat (+3)	Coklat (+3)	Coklat (+2)	Coklat (+2)	Coklat (+2)

Keterangan: Semakin banyak tanda (+) menunjukkan intensitas warna semakin tinggi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi lilin lebah, maka semakin baik *smart edible packaging* dalam menghambat kerusakan dan mempertahankan warna daging ayam kukus yang dibuktikan dalam intensitas warna coklat yang semakin kecil. Peningkatan konsentrasi lilin lebah juga menunjukkan peningkatan total fenol pada Gambar 4 yang dapat berfungsi sebagai antimikroba. Penurunan kualitas daging ayam kukus juga ditandai dengan peningkatan pH daging ayam kukus yang ditunjukkan pada Tabel 2. Menurut Rusdianto et al. (2021), peningkatan pH dapat disebabkan adanya perombakan senyawa-senyawa dalam produk daging oleh mikroba. Asam amino pada daging akan dideaminasi oleh mikroba menghasilkan senyawa yang bersifat basa, seperti amonia dan hidrogen sulfida. Gambar 6 menunjukkan grafik perubahan pH daging ayam kukus yang dihitung dari selisih hari ke-1, 2, dan 3 terhadap hari ke-0. Pada penyimpanan hari ke-1, ke-2, dan ke-3 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan dalam *smart edible packaging*, maka nilai perubahan pH daging ayam kukus semakin kecil. Hal ini menandakan bahwa peningkatan konsentrasi lilin lebah dapat menghambat kerusakan sampel daging ayam kukus.

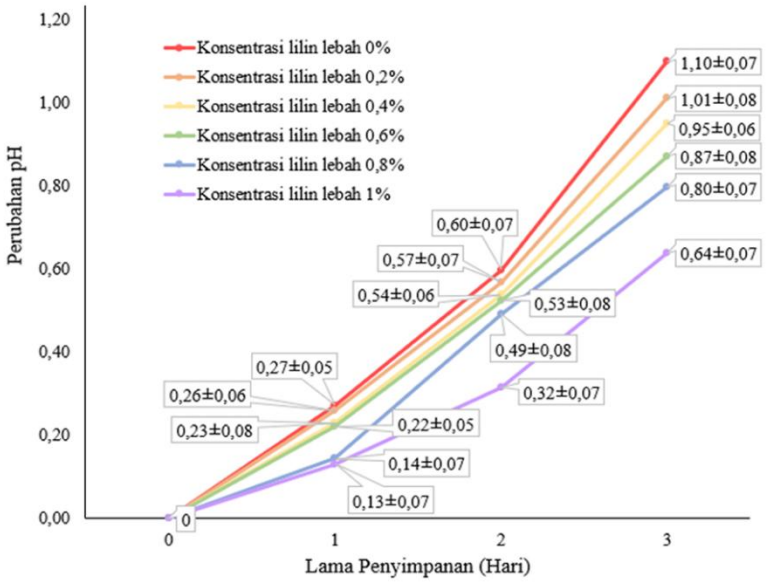
Perubahan Warna *Smart Edible Packaging* Selama Penyimpanan

Pengamatan perubahan warna *smart edible packaging* dilakukan setiap hari selama tiga hari menggunakan *color reader* dengan hasil yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Perubahan pH daging ayam kukus selama penyimpanan

Penyimpanan Hari Ke-	Konsentrasi Lilin Lebah (b/v)					
	0%	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1%
0	$6,22 \pm 0,07^{aA}$	$6,22 \pm 0,07^{aA}$	$6,22 \pm 0,07^{aA}$	$6,22 \pm 0,07^{aA}$	$6,22 \pm 0,07^{aA}$	$6,22 \pm 0,07^{aA}$
1	$6,49 \pm 0,02^{cB}$	$6,47 \pm 0,02^{cB}$	$6,45 \pm 0,01^{bB}$	$6,44 \pm 0,02^{bB}$	$6,36 \pm 0,02^{aB}$	$6,35 \pm 0,02^{aB}$
2	$6,82 \pm 0,03^{eC}$	$6,78 \pm 0,02^{deC}$	$6,75 \pm 0,02^{cdC}$	$6,74 \pm 0,01^{cC}$	$6,71 \pm 0,01^{bC}$	$6,53 \pm 0,02^{aC}$
3	$7,31 \pm 0,02^{fD}$	$7,23 \pm 0,02^{eD}$	$7,17 \pm 0,02^{dD}$	$7,09 \pm 0,02^{cD}$	$7,01 \pm 0,03^{bD}$	$6,85 \pm 0,02^{aD}$

Keterangan: Notasi (a–f) yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan nyata antar konsentrasi lilin lebah yang berbeda dan notasi (A–D) yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan nyata antar hari pada uji DMRT (α=5%)



Gambar 6. Perubahan pH daging ayam kukus selama penyimpanan

Tabel 3. Perubahan warna *smart edible packaging*

Penyimpanan Hari Ke-	Konsentrasi Lilin Lebah (b/v)					
	0%	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1%
0						
1						
2						
3						

Berdasarkan Tabel 3, semakin tinggi konsentrasi lilin lebah yang ditambahkan, maka warna *smart edible packaging* yang dihasilkan cenderung mengarah ke warna biru. Hasil ini didukung nilai *hue* pada hari ke-0 dengan konsentrasi 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; dan 1% secara berturut-turut sebesar 206,5; 229,3; 229,7; 242,6; 245,2; dan 247,3. Hal ini disebabkan pembentukan kristal lilin lebah saat memadat membentuk lapisan yang keruh sehingga memengaruhi warna *smart edible packaging* secara keseluruhan (Santoso, 2006).

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa seiring lamanya penyimpanan, *smart edible packaging* mengalami perubahan warna dari biru menjadi biru kehijauan, hijau kebiruan, dan

hijau. Perubahan warna tersebut didukung oleh nilai a*, b*, dan h° yang disajikan pada Tabel 4. Seiring lama penyimpanan, nilai a* semakin menurun dan nilai b* semakin meningkat menandakan intensitas warna hijau meningkat dan warna biru menurun pada *smart edible packaging*. Hal ini sejalan dengan nilai *hue* yang mengalami penurunan selama 3 hari penyimpanan.

Tabel 4. Nilai L*, a*, b*, C, dan h° *smart edible packaging* selama penyimpanan

Parameter	Penyimpanan Hari Ke-	Konsentrasi Lilin Lebah (b/v)					
		0%	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1%
L*	0	$24,5 \pm 0,3^{eA}$	$19,1 \pm 0,7^{dA}$	$17,8 \pm 0,1^{cA}$	$15,6 \pm 0,9^{bA}$	$14,3 \pm 0,2^{aA}$	$13,7 \pm 0,7^{aA}$
	1	$25,3 \pm 0,5^{eB}$	$21,9 \pm 0,4^{dB}$	$18,6 \pm 0,3^{cB}$	$15,8 \pm 0,9^{bA}$	$14,7 \pm 0,4^{aAB}$	$14,2 \pm 0,3^{aAB}$
	2	$26,4 \pm 0,4^{eC}$	$24,6 \pm 0,5^{dC}$	$22,0 \pm 0,3^{cC}$	$16,3 \pm 0,6^{bA}$	$15,2 \pm 0,3^{aBC}$	$14,6 \pm 0,2^{aBC}$
	3	$29,7 \pm 0,3^{eD}$	$25,6 \pm 0,5^{dD}$	$23,6 \pm 0,7^{cD}$	$16,8 \pm 0,8^{bA}$	$15,6 \pm 0,6^{aC}$	$15,0 \pm 0,2^{aC}$
a*	0	$-17,1 \pm 0,7^{aB}$	$-13,4 \pm 0,1^{bC}$	$-11,5 \pm 1,0^{cC}$	$-8,9 \pm 0,7^{dD}$	$-7,2 \pm 0,3^{eD}$	$-7,1 \pm 0,3^{eC}$
	1	$-17,2 \pm 0,4^{aB}$	$-13,7 \pm 0,1^{bC}$	$-12,1 \pm 0,4^{cC}$	$-10,0 \pm 0,8^{dC}$	$-8,4 \pm 0,7^{eC}$	$-7,9 \pm 0,6^{eC}$
	2	$-18,1 \pm 0,7^{aA}$	$-16,4 \pm 0,5^{bB}$	$-14,7 \pm 0,6^{cB}$	$-12,2 \pm 0,7^{dB}$	$-9,8 \pm 0,5^{eB}$	$-10,1 \pm 0,5^{eB}$
	3	$-17,2 \pm 0,5^{aB}$	$-17,9 \pm 0,6^{aA}$	$-16,1 \pm 0,3^{bA}$	$-14,6 \pm 0,4^{cA}$	$-12,6 \pm 0,4^{eA}$	$-13,5 \pm 0,7^{dA}$
b*	0	$-8,5 \pm 0,4^{dA}$	$-15,6 \pm 0,3^{bA}$	$-13,6 \pm 0,2^{cA}$	$-17,1 \pm 0,7^{aA}$	$-16,0 \pm 0,6^{bA}$	$-16,9 \pm 0,3^{aA}$
	1	$-6,5 \pm 1,0^{eB}$	$-13,4 \pm 0,3^{cB}$	$-12,1 \pm 0,2^{dB}$	$-16,1 \pm 0,5^{aB}$	$-15,1 \pm 0,7^{bA}$	$-15,8 \pm 0,2^{abA}$
	2	$-1,9 \pm 0,8^{dC}$	$-9,0 \pm 1,1^{cC}$	$-8,3 \pm 0,2^{cC}$	$-11,2 \pm 0,7^{aC}$	$-10,6 \pm 0,3^{bB}$	$-12,3 \pm 1,4^{aB}$
	3	$5,1 \pm 0,5^{dD}$	$-2,3 \pm 0,8^{cD}$	$-2,1 \pm 0,1^{cD}$	$-5,8 \pm 0,4^{bD}$	$-5,7 \pm 0,3^{bC}$	$-7,3 \pm 0,1^{aC}$
C	0	$19,1 \pm 0,5^{bC}$	$20,5 \pm 0,3^{cC}$	$17,8 \pm 0,7^{aC}$	$19,3 \pm 0,9^{bB}$	$17,6 \pm 0,6^{aB}$	$18,3 \pm 0,4^{abB}$
	1	$18,4 \pm 0,5^{bcB}$	$19,1 \pm 0,2^{cB}$	$17,1 \pm 0,3^{aBC}$	$18,9 \pm 0,7^{cB}$	$17,3 \pm 1,0^{aB}$	$17,7 \pm 0,5^{abB}$
	2	$18,2 \pm 0,6^{cAB}$	$18,7 \pm 0,4^{cB}$	$16,8 \pm 0,6^{bAB}$	$16,5 \pm 0,9^{bA}$	$15,9 \pm 1,4^{bA}$	$14,5 \pm 0,6^{aA}$
	3	$17,9 \pm 0,4^{dA}$	$18,0 \pm 0,6^{dA}$	$16,2 \pm 0,3^{cA}$	$15,7 \pm 0,5^{bcA}$	$15,3 \pm 0,7^{bA}$	$13,8 \pm 0,5^{aA}$
h°	0	$206,5 \pm 2,0^{aD}$	$229,3 \pm 0,6^{bD}$	$229,7 \pm 2,4^{bD}$	$242,6 \pm 1,1^{cD}$	$245,2 \pm 0,3^{dD}$	$247,3 \pm 1,0^{dD}$
	1	$200,8 \pm 2,9^{aC}$	$224,4 \pm 0,9^{bC}$	$225,0 \pm 1,0^{bC}$	$238,2 \pm 1,8^{cC}$	$241,0 \pm 1,0^{dC}$	$243,3 \pm 1,6^{dC}$
	2	$185,9 \pm 3,0^{aB}$	$208,9 \pm 3,5^{bB}$	$209,4 \pm 1,3^{bB}$	$222,6 \pm 0,6^{cB}$	$227,3 \pm 0,8^{dB}$	$230,5 \pm 2,2^{eB}$
	3	$163,6 \pm 1,8^{aA}$	$187,1 \pm 2,2^{bA}$	$187,5 \pm 0,4^{bA}$	$201,6 \pm 0,9^{cA}$	$204,3 \pm 0,4^{dA}$	$208,4 \pm 0,7^{eA}$

Keterangan: Notasi (a–e) yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan nyata antar konsentrasi lilin lebah yang berbeda dan notasi (A–D) yang berbeda menunjukkan adanya perbedaan nyata antar hari pada uji DMRT (α=5%)

Berdasarkan Tabel 4, nilai L* pada perlakuan T1 dan T3 menunjukkan adanya perbedaan nyata antar hari selama penyimpanan ditandai dengan notasi yang berbeda, namun pada perlakuan T6 terdapat hari penyimpanan yang tidak berbeda nyata dengan hari lainnya ditandai dengan notasi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan lilin lebah dapat menghambat perubahan nilai L*. Peningkatan nilai L* terjadi akibat adanya penurunan total antosianin pada *film* seiring peningkatan pH sehingga warna *film* semakin terang. Semakin tinggi konsentrasi lilin lebah dalam *smart edible packaging*, maka penghambatan terhadap transmisi uap air semakin baik sehingga kerusakan produk yang menyebabkan peningkatan pH dapat dihambat.

Nilai kroma *smart edible packaging* cenderung menurun seiring peningkatan konsentrasi lilin lebah. Menurut Santoso (2006), peningkatan konsentrasi lilin lebah dalam *edible film* dapat menurunkan nilai kroma karena kristal lilin lebah akan memadat membentuk lapisan yang keruh sehingga kejernihan *film* menurun. Seiring lamanya penyimpanan, nilai kroma *smart edible packaging* mengalami penurunan yang menandakan *smart edible packaging* semakin kusam. Sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Aprilliani et al. (2022), nilai kroma *smart edible packaging* berbasis kitosan mengalami penurunan seiring lama penyimpanan daging sapi yang diiringi dengan peningkatan pH daging. Penurunan nilai kroma dapat dipengaruhi oleh peningkatan pH yang mengakibatkan ketidakstabilan dan kerusakan pigmen antosianin semakin tinggi ditandai dengan warna yang semakin pucat/pudar dan kusam. Semakin besar konsentrasi lilin lebah menunjukkan penurunan nilai C *smart edible*

packaging semakin besar. Hal tersebut dapat terjadi karena peningkatan nilai L* yang signifikan pada perlakuan konsentrasi lilin lebah 0% dibandingkan 1% sehingga penurunan nilai kroma perlakuan konsentrasi lilin lebah 0% tidak terlalu signifikan dibandingkan konsentrasi lilin lebah 1%.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena kemampuan smart edible packaging sebagai indikator hanya diuji secara langsung pada daging ayam kukus selama penyimpanan. Uji sensitivitas secara in vitro, seperti vapor ammonia sensitivity assay pada berbagai konsentrasi amonia, belum dilakukan sebelum film diaplikasikan pada produk. Akibatnya, batas deteksi minimum, waktu respons, dan hubungan kuantitatif antara konsentrasi uap amonia dan intensitas perubahan warna film belum dapat diketahui. Hasil penelitian ini baru menunjukkan bahwa film mampu berubah warna dari biru menjadi hijau seiring penurunan mutu daging ayam kukus, tetapi belum dapat menunjukkan pada tingkat kerusakan berapa perubahan warna tersebut mulai terdeteksi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu melakukan uji sensitivitas terhadap uap amonia pada berbagai konsentrasi sebelum film diaplikasikan pada produk. Hasil uji tersebut dapat dikorelasikan dengan parameter kesegaran daging, sehingga kemampuan film sebagai indikator dapat diketahui secara lebih akurat.

KESIMPULAN

Peningkatan konsentrasi lilin lebah dapat menurunkan nilai kuat tarik (0,05–0,14 N/mm²) dan WVTR (64,42–89,23 g/m²/hari) *smart edible packaging*. Peningkatan konsentrasi lilin lebah dapat meningkatkan nilai persen pemanjangan (42,68–52,98%), total fenol (897,78–994,89 mg GAE/100 g sampel), dan aktivitas antioksidan (65,54–92,24%RSA) *smart edible packaging*. Peningkatan konsentrasi lilin lebah pada *smart edible packaging* mampu meningkatkan kemampuannya untuk mempertahankan kualitas daging ayam kukus dari segi warna daging ayam kukus dengan nilai pH dan intensitas warna coklat yang semakin kecil. Peningkatan konsentrasi lilin lebah menghasilkan warna *smart edible packaging* yang cenderung semakin biru, gelap, dan kusam ditandai dengan penurunan nilai L*, b*, dan C dan peningkatan nilai a* dan *hue smart edible packaging*. *Smart edible packaging* terutama pada perlakuan konsentrasi lilin lebah 0%–0,4% mampu menunjukkan perubahan kualitas daging ayam kukus melalui perubahan warna lebih jelas dibandingkan konsentrasi lilin lebah 0,6%–1% selama 3 hari penyimpanan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas pendanaan penelitian ini melalui Hibah Penelitian Dana Fakultas 2025.

DAFTAR PUSTAKA

Abdulla, S. F., Shams, R., & Dash, K. K. (2024). Edible packaging as sustainable alternative to synthetic plastic: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, *32*(52), 29566–29580. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32806-z

Adam, A. A., Jasniewski, J., Vuillemin, M. E., Simard, B., Burgain, J., Badin, R., Muniglia, L., & Michaux, F. (2022). Enzymatic mediated modification of gum Arabic by curcumin

oxidation products: Physicochemical and self-assembly study. *Food Hydrocolloids*, *126*, 107451. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107451

Amin, U., Khan, M. K. I., Maan, A. A., Nazir, A., Riaz, S., Khan, M. U., Sultan, M., Munekata, P. E. S., & Lorenzo, J. M. (2022). Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. *Food Packaging and Shelf Life*, *33*, 100903. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100903

Aprilliani, F., Ayuningtyas, L. P., & Lestari, H. A. (2022). Bunga telang (*Clitoria ternatea* L.) sebagai indikator pH dalam sistem kemasan pintar. *Agroteknika*, *5*(2), 87–97.

Betancur-D'Ambrosio, M. C., Pérez-Cervera, C. E., Barrera-Martinez, C., & Andrade-Pizarro, R. (2024). Antimicrobial activity, mechanical and thermal properties of cassava starch films incorporated with beeswax and propolis. *Journal of Food Science and Technology*, *61*(4), 782–789. https://doi.org/10.1007/s13197-023-05878-x

Cecchini, J. P., Spotti, M. J., Piagentini, A., Milt, V. G., & Carrara, C. R. (2017). Development of edible films obtained from submicron emulsions based on whey protein concentrate, oil/beeswax and brea gum. *Food Science and Technology International*, *23*(4), 371–381. https://doi.org/10.1177/1082013217695170

Cortés-Rodríguez, M., Villegas-Yépez, C., González, J. H. G., Rodríguez, P. E., & Ortega-Toro, R. (2020). Development and evaluation of edible films based on cassava starch, whey protein, and bees wax. *Heliyon*, *6*(9), e04884. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04884.

Dawa, D. L. (2021). *Efektivitas ekstrak bawang putih (Allium sativum L.) terhadap uji Eber dan organoleptik pada pengawetan daging kambing kacang (Capra aegagrus hircus)* [Skripsi]. Universitas Wijaya Kusuma Surabaya.

Ermawati, T. A., & Rahmadhia, S. N. (2023). Physico-chemical characteristics of edible film from breadfruit starch (*Artocarpus altilis*) and beeswax. *Advances in Food Science, Sustainable Agriculture and Agroindustrial Engineering*, *6*(4), 325–337. https://doi.org/10.21776/ub.afssaae.2023.006.04.1

Goycoolea, F. M., Morris, E. R., Richardson, R. K., & Bell, A. E. (1995). Solution rheology of mesquite gum in comparison with gum arabic. *Carbohydrate Polymers*, *27*(1), 37–45. https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00031-2

Gregory, S., Setijawaty, E., & Jati, I. R. A. P. (2024). The development of konjac based smart edible film packaging with roselle flower extract and chicken eggshell as active agents. *Teknologi Pangan: Media Informasi dan Komunikasi Ilmiah Teknologi Pertanian*, *15*(1), 95–111. https://doi.org/10.35891/tp.v15i1.4612

Huri, D., & Nisa, F. C. (2014). Pengaruh konsentrasi gliserol dan ekstrak ampas kulit apel terhadap karakteristik fisik dan kimia edible film. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, *2*(4), 29–40.

Indriyati, Frecilla, N., Nuryadin, B. W., Irmawati, Y., & Srikandace, Y. (2020). Enhanced hydrophobicity and elasticity of bacterial cellulose films by addition of beeswax. *Macromolecular Symposia*, *391*(1), 1900174. https://doi.org/10.1002/masy.201900174

Jati, I. R. A. P., Darmoatmodjo, L. M. Y. D., Suseno, T. I. P., Ristiarini, S., & Wibowo, C. (2022). Effect of processing on bioactive compounds, antioxidant activity, physicochemical, and sensory properties of orange sweet potato, red rice, and their

application for flake products. *Plants*, *11*(3), 440. https://doi.org/10.3390/plants11030440

Jati, I. R. A. P., Elaine, J., Setijawaty, E., & Utomo, A. R. (2024). Development of bio-based smart edible food packaging using roselle flower extract and eggshell powder as active agents. *BIO Web of Conferences*, *98*, 05001. https://doi.org/10.1051/bioconf/20249805001

Japanese Industrial Standard. (1975). JIS Z 1707: General rules of plastic films for food packaging. Japanese Standards Association.

Kurek-Górecka, A., Górecki, M., Rzepecka-Stojko, A., Balwierz, R., & Stojko, J. (2020). Bee products in dermatology and skin care. *Molecules*, *25*(3), 556. https://doi.org/10.3390/molecules25030556

Li, C., Wang, L., & Xue, F. (2019). Effects of conjugation between proteins and polysaccharides on the physical properties of emulsion-based edible films. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *96*(11), 1249–1263. https://doi.org/10.1002/aocs.12278

Liu, Z., Lin, D., Shen, R., Zhang, R., Liu, L., & Yang, X. (2021). Konjac glucomannan-based edible films loaded with thyme essential oil: Physical properties and antioxidant-antibacterial activities. *Food Packaging and Shelf Life*, *29*, 100700.

Nabila, S. D. P., Kusdarwati, R., & Agustono, A. (2018). Pengaruh penambahan beeswax sebagai plasticizer terhadap karakteristik fisik edible film kitosan [The effect of using beeswax as plasticizer against physical characteristics of chitosan edible film]. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, *10*(1), 34–39.

Oko, S., Kurniawan, A., & Alam, G. R. P. (2023). Pengaruh penambahan massa lilin lebah (beeswax) sebagai zat anti air pada pembuatan edible film dari beras merah (*Oryza nivara*). *Jurnal Teknologi*, *15*(1), 65–72.

Oredokun-Lache, B. A., Ibrahim, E. B., Oluwafemi, A. G., Erifeta, G. O., Josiah, S. J., & Oluba, O. M. (2024). A circular economical application of eggshell waste as a bio-filler in the fabrication of gum Arabic composite film. *Food Science and Preservation*, *31*(3), 394–407.

Rusdianto, A. S., Wiyono, A. E., & Tauvika, N. (2021). Penentuan tingkat kesegaran daging ayam menggunakan label pintar berbasis ekstrak antosianin ubi jalar ungu. *Jurnal Agroindustri*, *11*(1), 11–22.

Santoso, A. A. K., Yoshari, R. M., & Jati, I. R. A. P. (2024). Karakteristik biodegradable packaging dengan penambahan bunga telang dan cangkang telur. *Jurnal Teknologi Pangan*, *18*(1), 77–102.

Santoso, B. (2006). Karakterisasi komposit edible film buah kolang-kaling (*Arenga pinnata*) dan lilin lebah (beeswax) [Characterization of composite edible film from palm fruit (*Arenga pinnata*) and beeswax]. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, *17*(2), 125–135.

Sawicki, T., Starowicz, M., Kłębukowska, L., & Hanus, P. (2022). The profile of polyphenolic compounds, contents of total phenolics and flavonoids, and antioxidant and antimicrobial properties of bee products. *Molecules*, *27*(4), 1301. https://doi.org/10.3390/molecules27041301

Vonnie, J. M., Rovina, K., Azhar, R. A., Huda, N., Erna, K. H., Felicia, W. X. L., Nur'Aqilah, M. N., & Halid, N. F. A. (2022). Development and characterization of the biodegradable

film derived from eggshell and cornstarch. *Journal of Functional Biomaterials*, *13*(2), 67. https://doi.org/10.3390/jfb13020067