

Kebutuhan akan produk pangan dengan umur simpan yang lebih panjang mendorong pengembangan teknologi pengemasan yang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung pasif, tetapi juga mampu berinteraksi secara aktif dengan produk. *Active packaging* merupakan sistem kemasan yang dirancang untuk mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan pangan melalui pelepasan atau penyerapan senyawa aktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan film kemasan aktif berbasis serbuk agar dengan penambahan senyawa fenolik dari ekstrak kulit kakao (*Theobroma cacao* L.) sebagai agen antioksidan dan antimikroba alami, serta gliserol sebagai *plasticizer*. Ekstrak kulit kakao diperoleh melalui proses ekstraksi menggunakan *deep eutectic solvent* (DES) berbasis kolin klorida–asam laktat. Film kemasan aktif disiapkan dengan metode *solvent casting* menggunakan variasi konsentrasi gliserol sebesar 30%, 40%, dan 50% (b/b) serta senyawa fenolik ekstrak kulit kakao sebesar 10, 15 dan 20% b/b. Karakterisasi film meliputi analisis gugus fungsi (FTIR), morfologi permukaan (SEM), sifat mekanik (kekuatan tarik dan perpanjangan putus), laju transmisi uap air (WVTR), penyerapan air, aktivitas antioksidan menggunakan metode DPPH, aktivitas antimikroba terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*, serta analisis kinetika pelepasan senyawa fenolik berdasarkan hukum difusi Fick.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ekstrak kulit kakao memiliki total phenolic content (TPC) sebesar 2,65 mg GAE/mL. Penambahan fenolik CPHE menyebabkan perubahan warna film dari transparan menjadi cokelat tua serta meningkatkan kekasaran permukaan, yang terkonfirmasi melalui SEM. Analisis FTIR menunjukkan pita serapan khas gugus fenolik, terutama gugus –OH ( $3270\text{--}3355\text{ cm}^{-1}$ ) dan cincin aromatik. yang mengindikasikan adanya interaksi ikatan hidrogen dengan matriks agar–gliserol. Nilai WVTR menurun signifikan dari  $1123,14 \pm 0,52\text{ g/m}^2\cdot\text{hari}$  (AG30) menjadi  $769,90 \pm 4,26\text{ g/m}^2\cdot\text{hari}$  (AG30K20) seiring meningkatnya konsentrasi fenolik. Sebaliknya, peningkatan konsentrasi gliserol dari 30% menjadi 50% meningkatkan WVTR hingga  $1035,95 \pm 1,04\text{ g/m}^2\cdot\text{hari}$ . Penyerapan air menunjukkan tren serupa, menurun dengan penambahan fenolik namun meningkat dengan peningkatan gliserol. Sifat mekanik film dipengaruhi signifikan oleh komposisi. Kekuatan tarik menurun dari  $28,08 \pm 0,58\text{ MPa}$  (AG30) menjadi  $23,10 \pm 0,57\text{ MPa}$  (AG30K20), perpanjangan putus optimum diperoleh pada penambahan fenolik 15% b/b, yaitu  $31,88 \pm 0,57\%$ . Aktivitas antibakteri meningkat seiring kenaikan konsentrasi fenolik, dengan diameter zona inhibisi terhadap *E. coli* dan *S. aureus* masing-masing mencapai  $18,00 \pm 0,00\text{ mm}$  dan  $20,67 \pm 4,04\text{ mm}$  pada formulasi AG30K20. Pemodelan rilis antioksidan menunjukkan bahwa film dengan gliserol 30% (AG30) memiliki profil rilis paling terkontrol, dengan nilai koefisien difusi (D) berkisar  $9,10 \times 10^{-11}$  hingga  $1,30 \times 10^{-10}\text{ cm}^2/\text{s}$ . Secara keseluruhan, film kemasan aktif berbasis agar dengan senyawa fenolik kulit kakao berpotensi sebagai material kemasan ramah lingkungan yang efektif dalam memperpanjang umur simpan produk pangan dan memanfaatkan limbah agroindustri secara berkelanjutan.

Kata kunci: Kemasan aktif; Agar; Aktivitas antioksidan; Kulit kakao; Senyawa fenolik

## ABSTRACT

The increasing demand for food products with extended shelf life has driven the development of packaging technologies that function not only as passive barriers but also actively interact with the packaged food. Active packaging is designed to maintain quality and extend shelf life through the controlled release or absorption of active compounds. This study aimed to develop active packaging films based on agar powder incorporated with phenolic compounds extracted from cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.) as natural antioxidant and antimicrobial agents, with glycerol used as a plasticizer. Cocoa pod husk extract was obtained through extraction using a deep eutectic solvent (DES) system based on choline chloride–lactic acid. The active packaging films were prepared by the solvent casting method with varying glycerol concentrations of 30%, 40%, and 50% (w/w) and phenolic compound loadings of 10, 15, and 20 (w/w). Film characterization included functional group analysis (FTIR), surface morphology (SEM), mechanical properties (tensile strength and elongation at break), water vapor transmission rate (WVTR), water absorption, antioxidant activity evaluated by the DPPH method, antimicrobial activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, and phenolic release kinetics analysis based on Fick's diffusion law.

The results showed that the cocoa pod husk extract possessed a total phenolic content (TPC) of 2.65 mg GAE/mL. Incorporation of cocoa pod husk extract (CPHE) altered the film color from transparent to dark brown and increased surface roughness, as confirmed by SEM analysis. FTIR spectra revealed characteristic absorption bands of phenolic groups, particularly –OH stretching vibrations ( $3270\text{--}3355\text{ cm}^{-1}$ ) and aromatic ring structures, indicating hydrogen bonding interactions with the agar–glycerol matrix. The WVTR significantly decreased from  $1123.14 \pm 0.52\text{ g/m}^2\text{-day}$  for AG30 to  $769.90 \pm 4.26\text{ g/m}^2\text{-day}$  for AG30K20 with increasing phenolic concentration. Conversely, increasing glycerol concentration from 30% to 50% led to an increase in WVTR up to  $1035.95 \pm 1.04\text{ g/m}^2\text{-day}$ . Water absorption exhibited a similar trend, decreasing with phenolic addition but increasing with higher glycerol content. The mechanical properties of the films were significantly influenced by composition. Tensile strength decreased from  $28.08 \pm 0.58\text{ MPa}$  (AG30) to  $23.10 \pm 0.57\text{ MPa}$  (AG30K20), while optimal elongation at break was achieved at 15% (w/w) phenolic addition, reaching  $31.88 \pm 0.57\%$ . Antibacterial activity increased with higher phenolic concentrations, with inhibition zone diameters against *E. coli* and *S. aureus* reaching  $18.00 \pm 0.00\text{ mm}$  and  $20.67 \pm 4.04\text{ mm}$ , respectively, for the AG30K20 formulation. Antioxidant release modeling demonstrated that films containing 30% glycerol (AG30) exhibited the most controlled release profile, with diffusion coefficient (D) values ranging from  $9.10 \times 10^{-11}$  to  $1.30 \times 10^{-10}\text{ cm}^2/\text{s}$ . Overall, agar-based active packaging films incorporating cocoa pod husk phenolic compounds show strong potential as environmentally friendly packaging materials for extending food shelf life while promoting the sustainable valorization of agro-industrial waste.

Keywords: Active packaging; Agar; Antioxidant activity; Cocoa shell; Phenolic compounds