

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengemasan merupakan bagian dasar yang paling dibutuhkan suatu produk terutama pada produk pangan. Kemasan pangan dituntut memiliki nilai lebih dalam penggunaannya. Jenis bahan kemasan pangan yang biasanya digunakan yaitu kemasan plastik konvensional (Kamaruddin et al., 2021). Kemasan plastik konvensional memiliki kelebihan seperti elastisitas yang tinggi, kuat, ringan, transparan, tingkat permeabilitas yang rendah dan murah sehingga plastik ini menjadi pilihan utama untuk mengemas suatu produk (Kharisma & Khairi, 2022). Namun kemasan plastik konvensional juga memiliki kekurangan seperti berbahan baku fosil bumi, sangat sulit untuk diurai sehingga berdampak pada pencemaran dan kerusakan lingkungan (Ncube et al., 2021). Sehingga banyak hal lain yang perlu diperhatikan, salah satunya pengurangan penggunaan bahan kemasan plastik konvensional karena dapat merusak lingkungan sehingga dibutuhkan suatu teknik pengemasan yang ramah lingkungan yaitu plastik *biodegradable* (Maimunah, 2018).

Plastik *biodegradable* merupakan plastik yang dapat diuraikan secara alami oleh mikroorganisme (Purnavita & Utami, 2018). Bahan utama yang sering digunakan pada pembuatan plastik *biodegradable* yaitu pati dan *poly lactic acid* (PLA). PLA merupakan biopolimer yang tersusun dari monomer asam laktat hasil dari proses fermentasi yang menggunakan bahan baku pati atau selulosa. PLA sebagai bahan pengganti plastik konvensional memiliki keunggulan seperti *biocompatible* dan *recyclable* yang diperoleh dari bahan yang dapat diperbaharui, dan dapat dibakar secara sempurna sehingga ramah lingkungan dan aman untuk makanan (Reddy, 2013). Namun, plastik *biodegradable* juga memiliki kelemahan diantaranya memiliki daya stabilitas termal yang rendah, daya permeabilitas yang tinggi sehingga memungkinkan oksigen dapat menembus dan masuk ke dalam kemasan yang dapat mempengaruhi produk pangan yang dikemas sehingga membutuhkan bahan atau senyawa yang dapat meminimalisir terbentuknya plastik yang memiliki permeabilitas tinggi (Stefaniak & Masek, 2021). Kelemahan yang dimiliki plastik PLA dapat diatasi dengan penambahan senyawa yang dapat meminimalisir kekurangan yang ada seperti penambahan mikrokristalin dari selulosa. Penggabungan selulosa mikrokristalin menghadirkan pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi kelemahan PLA. Dengan meningkatkan sifat fisik dan mekanik, selulosa mikrokristalin secara efektif mengurangi permeabilitas oksigen pada kemasan, meningkatkan kekuatan mekanik dan stabilitas termal polimer yang dapat terurai secara hayati (Murphy & Collins, 2016; Zhu et al., 2020).

Penggunaan plastik *biodegradable* diharapkan tidak hanya bersifat ramah lingkungan, tetapi juga harus mampu mempertahankan atau meningkatkan kualitas makanan dalam kemasan. Mengatasi oksigen dalam kemasan sangat

penting, karena produk makanan yang teroksidasi dapat mengalami efek negatif seperti perubahan warna, hilangnya nilai gizi, dan kerusakan sensorik. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan penyerap oksigen atau *oxygen scavenger* sebagai kemasan aktif (Gaikwad et al., 2018). *Oxygen scavenger* sebagai kemasan aktif ini bekerja dengan cara memasukkan bahan penyerap oksigen yang menangkap oksigen di dalam kemasan atau dapat berinteraksi langsung dengan produk atau lingkungan sekitarnya untuk meningkatkan kualitas dan keamanan produk. Senyawa seperti asam askorbat dan asam galat dapat diintegrasikan ke dalam kemasan yang berfungsi sebagai penyerap oksigen (J. S. Lee et al., 2018). Mekanisme ini melibatkan reaksi kimia yang mengikat atau mereduksi oksigen, yang secara efektif mencegah oksidasi dan memperpanjang umur simpan produk (María Roberta, 2020).

Kemasan plastik *biodegradable* yang ditambah dengan asam askorbat dan asam galat menawarkan metode yang efektif untuk menyerap oksigen, sehingga menjaga kualitas produk makanan (Vilela et al., 2018). Asam askorbat, yang dikenal sebagai antioksidan kuat, terlibat dalam reaksi redoks dimana ia bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan dehidroaskorbat dan air. Reaksi ini mengurangi tingkat oksigen dalam kemasan, yang pada gilirannya membantu memperlambat oksidasi komponen sensitif, seperti lemak dan pigmen dalam makanan (Yin et al., 2022). Selain itu, asam galat senyawa fenolik yang terjadi secara alami, menyerap oksigen dengan melepaskan elektron dan membentuk radikal galat yang stabil. Proses ini membantu menghambat reaksi oksidasi lanjutan yang dapat merusak kualitas pangan.

Oxygen scavenger yang digunakan dapat berupa *sachet*, label, atau dicampurkan secara langsung ke dalam polimer kemasan. Akan tetapi, penggunaan dalam bentuk *sachet* dapat mencemari produk yang dikemas apabila terjadi kebocoran sehingga diperlukan solusi penyerap oksigen yang inovatif dan aman (Viana Batista et al., 2022). Dengan mengintegrasikan agen penyerap oksigen dengan kemasan plastik yang dapat terurai secara hayati, maka dapat meningkatkan keamanan produk dan memastikan perlindungan yang efektif (Cruz et al., 2012). Selain itu, penggabungan senyawa bioaktif seperti asam askorbat dan asam galat ke dalam kemasan memberikan solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Buah alpukat merupakan salah satu komoditas hortikultura yang kaya akan kandungan gizi (Stephen & Radhakrishnan, 2022; Waly et al., 2023). Namun buah alpukat termasuk dalam kelompok buah klimakterik yang sangat rentan. Buah klimakterik merupakan buah yang mengalami peningkatan respirasi maupun etilen selama buah matang (Hu et al., 2024). Selama pematangan, perubahan fisiologis dan kimiawi terjadi karena reaksi kimia di dalam buah. Perubahan ini akan berpengaruh terhadap mutu, baik itu mutu organoleptik ataupun kandungan gizi buah. Selama proses pematangan terjadi berbagai reaksi kimia penguraian dan juga sintesis senyawa baru. Proses tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan fisik pada buah seperti tekstur menjadi lebih lunak, perubahan warna pada kulit buah dan daging buah, serta perubahan rasa dan aroma (Kokawa et al., 2020; Matsui et al., 2025). Perubahan tersebut dapat dijadikan parameter tingkat

kesegaran buah.

Dalam upaya menjaga kesegaran dan memperpanjang umur simpan buah alpukat, dibutuhkan teknologi pascapanen yang tidak hanya mampu menghambat proses kerusakan, tetapi juga dapat memberikan informasi visual terkait kondisi buah secara *real-time*. Salah satu solusi yang dapat dilakukan yaitu penggunaan label indikator sebagai kemasan cerdas. Kemasan cerdas merupakan kemasan dilengkapi dengan indikator berfungsi untuk memantau kualitas dan keamanan produk pangan baik selama penyimpanan, transportasi dan pemasaran (Kuswandi, Wicaksono; Jayus, et al., 2011). Prinsip kerja label indikator berdasarkan perubahan warna yang dipicu karena reaksi kimia yang memberikan sinyal informasi visual kepada konsumen terkait kondisi mutu dari produk yang dikemas (Dirpan et al., 2023, 2024).

Penelitian mengenai kemasan cerdas dan aktif telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya seperti pengaplikasian kemasan cerdas pada buah mangga menggunakan indikator *bromophenol blue* yang mengalami perubahan warna dari biru ke hijau jika buah mangga tidak layak konsumsi (Dirpan et al., 2018), pada buah alpukat warna indikator kemasan cerdas berubah dari warna ungu ke warna merah ketika buah telah busuk (Dirpan et al., 2021), penelitian kemasan cerdas yang diaplikasikan pada kemasan daging, ikan dan ayam (Agustianti et al., 2021; Dirpan et al., 2018, 2019, 2021, 2022; Dirpan & Hidayat, 2023; Hidayat et al., 2019; Julyaningsih et al., 2020; Yolanda et al., 2020) dan pada daging kerbau (Shukla et al., 2015), penggunaan indikator *bromothymol blue* untuk memantau kesegaran mutu strawberry (Chen et al., 2024), apel (Zhang et al., 2024), tomat (Mao et al., 2024) dan pengaplikasian kemasan aktif pada roti tawar (Arfan, 2025) dengan penambahan *oxygen scavenger* dari asam galat dan asam askorbat (2,5% dan 5%) merupakan perlakuan terbaik dapat menurunkan nilai permeabilitas oksigen, meningkatkan kemampuan biodegradable serta mempengaruhi kekuatan mekanik seperti kuat tarik, elongasi dan ketebalan plastik. Hanya saja pada penelitian sebelumnya tidak menggabungkan kemasan cerdas dan aktif pada pengaplikasian produk pasca panen, umumnya hanya menggunakan salah satu kemasan aktif atau pun cerdas.

Berdasarkan uraian diatas, maka dilakukan penelitian dengan judul “Karakterisasi dan Validitas Plastik Biodegradable Berpenyerap Oksigen yang Dilengkapi Label Indikator sebagai Kemasan Cerdas dan Aktif untuk Buah Alpukat”. Penelitian ini diharapkan dapat mendorong pengembangan inovasi dan meningkatkan eksistensi teknologi pengemasan cerdas dan aktif yang dapat mempertahankan mutu dan masa simpan produk yang dikemas serta ramah lingkungan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakterisasi plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen yang dilengkapi label indikator sebagai kemasan cerdas dan aktif untuk buah alpukat?
2. Bagaimana validasi plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen yang dilengkapi label indikator sebagai kemasan cerdas dan aktif untuk buah alpukat?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakterisasi plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen yang dilengkapi label indikator sebagai kemasan cerdas dan aktif untuk buah alpukat.
2. Memvalidasi plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen yang dilengkapi label indikator sebagai kemasan cerdas dan aktif untuk buah alpukat.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan menjadi referensi terkait plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen yang menjadi kemasan aktif pada produk pangan dengan menggunakan bahan alami sehingga tidak memberikan dampak negatif bagi produk yang dikemas serta membantu konsumen memilih produk hortikultura yang memiliki tingkat kesegaran yang baik tanpa harus membuka kemasannya dengan pengaplikasian kemasan cerdas. Temuan dari penelitian ini dapat mendorong pengembangan inovasi dan meningkatkan eksistensi teknologi pengemasan cerdas dan aktif serta ramah lingkungan.

BAB II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan September 2025 – Desember 2025. Tempat penelitian akan dilaksanakan di Gedung Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Lantai 3 (GDLN), Universitas Hasanuddin, Makassar.

2.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu cetakan plastik, botol kaca, oven pengering, timbangan analitik, wadah plastik, *hot plate*, *stirrer*, *tension testing*, SEM, pengering Listrik (*Philips* PH 8102), pH meter, gelas kimia, labu ukur, desikator, mikrometer sekrup, erlenmeyer, pipet tetes, *refractometer* (Atago 3810), *rheometer* (tipe CR 300 DX), *colorimeter*, *diffractometer* dan *spectofotometer infra red*.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu aquades, buah alpukat yang diambil dari Malino, Kecamatan Tinggimoncong, Kabupaten Gowa dengan tingkat kematangan *mature* atau siap panen, gelas plastik, bubuk mikrokristalin selulosa, asam galat, asam askorbat, kloroform, serbuk besi, *poly lactic acid* (PLA), *polyethylene glycol* 400 (PEG-400), tanah kompos, indikator *bromothymol blue*, etanol 95%, asam asetat glasial, kertas *whatman* no.1, plastik LDPE (*Low Density Polyethylene*), indikator *phenolphthalein*, NaOH 0,1N, iodium 0,01N dan indikator amilum 1%.

2.3. Prosedur Penelitian

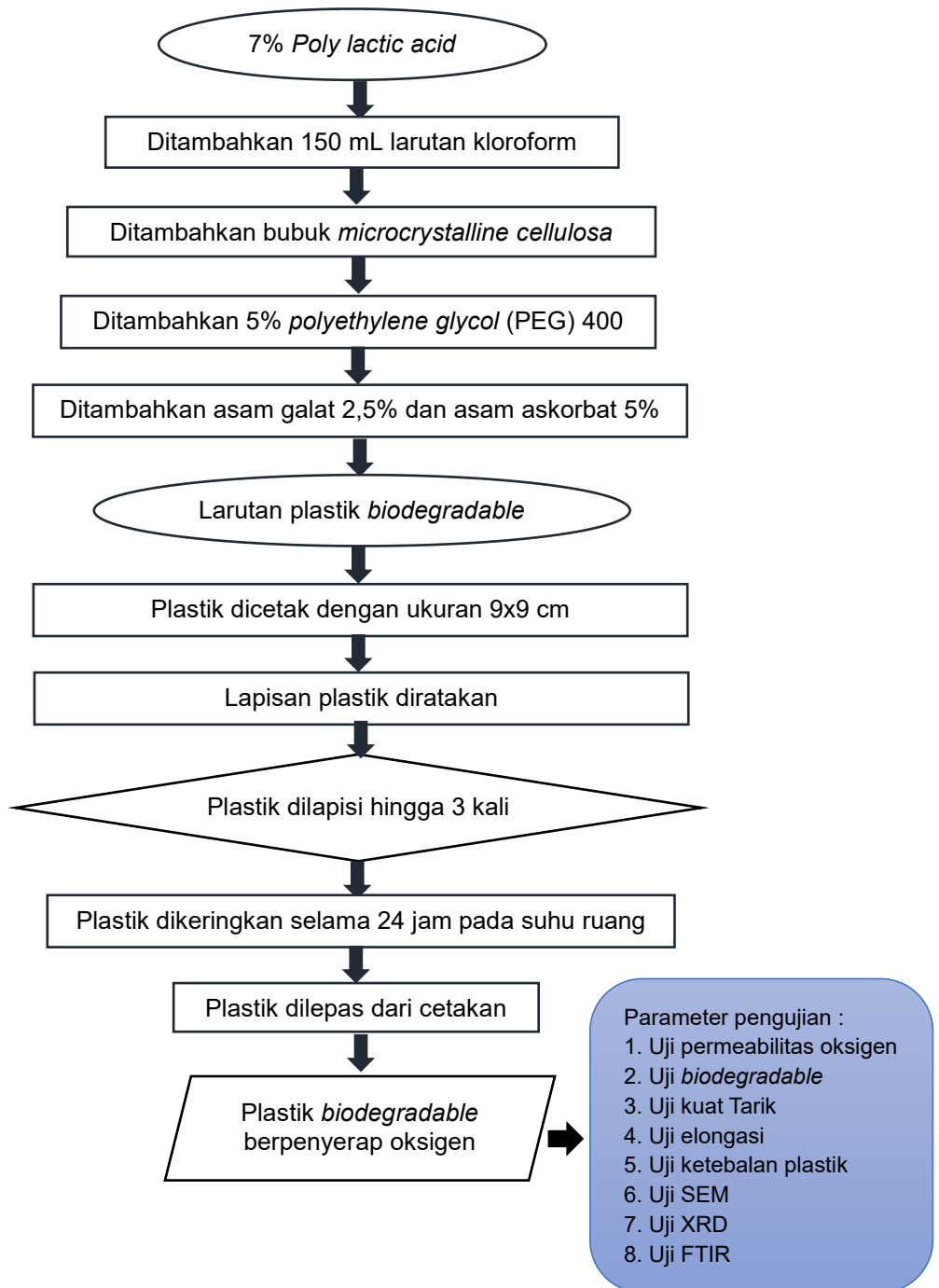
Prosedur kerja pada penelitian ini dibagi menjadi 2 (dua) tahap sebagai berikut:

2.3.1. Penelitian Tahap I

Penelitian tahap I yaitu pembuatan plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen dan pembuatan label indikator

- a. Pembuatan Plastik *Biodegradable* Berpenyerap Oksigen (di Giuseppe et al., 2022)

Pembuatan plastik *biodegradable* yaitu larutan kloroform dimasukkan kedalam wadah kemudian ditambahkan PLA sebanyak 7% dari jumlah larutan kloroform yang digunakan, lalu dihomogenkan menggunakan *stirrer* kecepatan 750 rpm dengan suhu *hotplate* 25°C. Selanjutnya ditambahkan mikrokristalin selulosa 10% (b/b) dari berat PLA kemudian ditambahkan asam galat sebanyak 2,5% dan asam askorbat sebanyak 5% sesuai dengan perlakuan, lalu ditambahkan *polyethylene glycol* 400 (PEG-400) sebagai *plasticizer* dengan konsentrasi 5% (b/b) dari berat PLA. Selanjutnya larutan dihomogenkan selama 60 menit. Larutan yang telah homogen akan dituang ke cetakan plastik dengan ukuran 9X9 sebanyak 5 g per layer lalu diratakan dan ditunggu hingga kering, kemudian diulang hingga terbentuk 3 *layer* dan dikeringkan selama 24 jam pada suhu ruang. Diagram alir pembuatan plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen dapat dilihat pada Gambar 1.

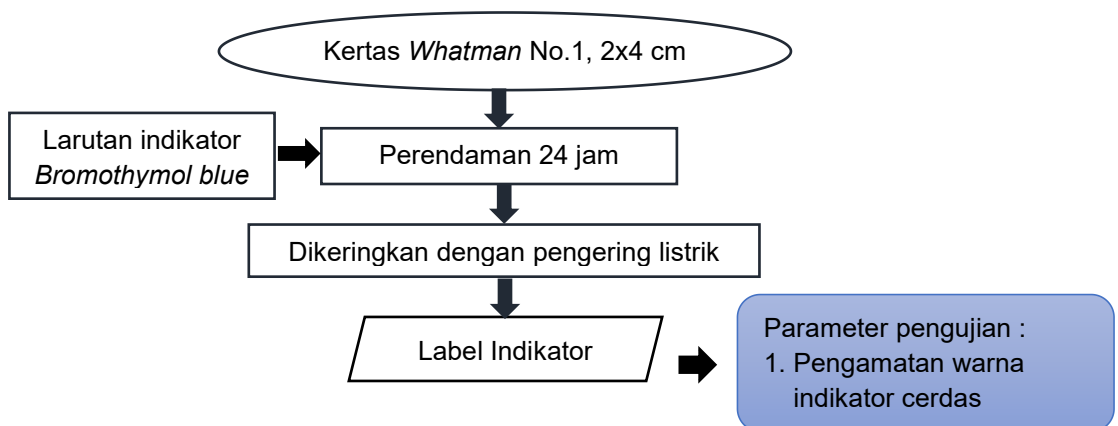


Gambar 1. Diagram alir pembuatan plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen

b. Pembuatan Larutan Indikator dan Label Indikator

Pembuatan Larutan indikator *Bromothymol Blue* sebanyak 1% (b/v) yang dilarutkan dengan etanol 95%. Selanjutnya buat rentang pH untuk buah alpukat yaitu 6,5, 7 , dan 7,5. Selanjutnya indikator diatur ke pH 6,5 dengan menggunakan larutan asam asetat glasial yang cocok untuk pH awal buah alpukat(Kuswandi & Nurfawaidi, 2017).

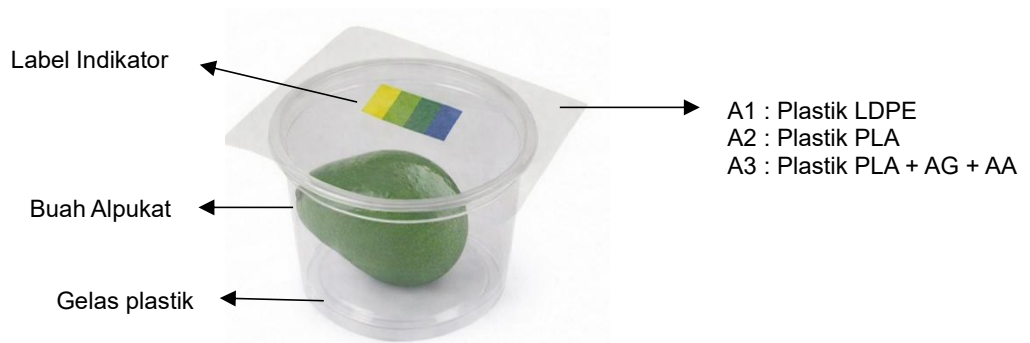
Kertas *Whatman* no. 1 dipotong dengan ukuran 2,4 cm dan direndam dalam 20 mL larutan indikator selama 24 jam pada suhu ruang. Label indikator kemudian dikeringkan menggunakan pengering listrik (Philips PH 8102) dan dalam wadah tertutup dengan jarak pengeringan 30 cm. Diagram alir pembuatan larutan indikator dan label indikator dapat dilihat pada Gambar 2.



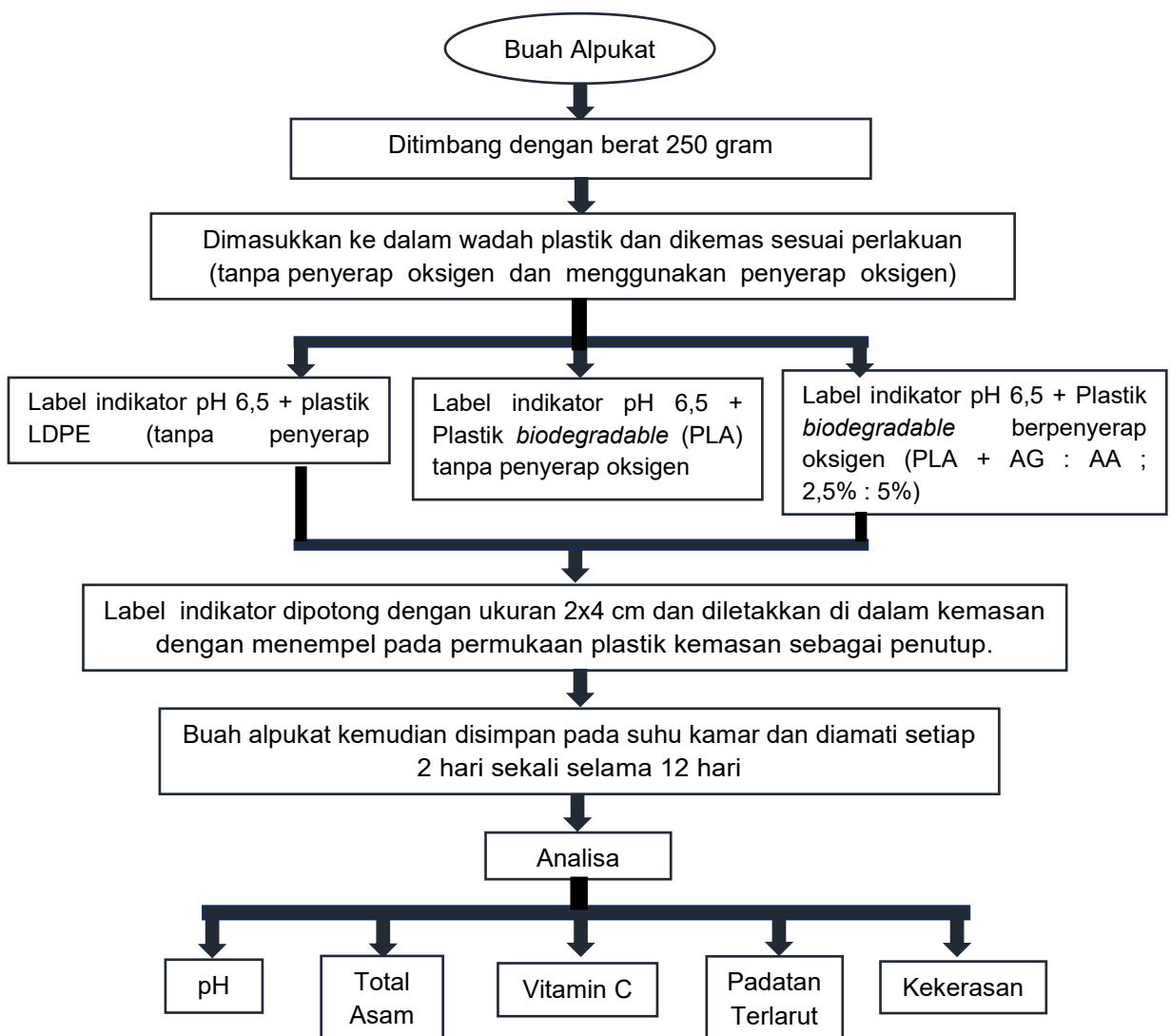
Gambar 2. Diagram alir pembuatan larutan indikator dan label indikator

2.3.2. Penelitian Tahap II

Penelitian tahap II yaitu validasi plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen dan label indikator pada produk hasil pertanian. Satu buah alpukat ditimbang dengan berat ± 250 gram untuk setiap wadah, kemudian dimasukkan ke dalam wadah plastik dan dikemas sesuai perlakuan yaitu tanpa penyerap oksigen (plastik LDPE) dan menggunakan penyerap oksigen. Label indikator kemudian dipotong dengan ukuran 2x4 cm dan masing-masing label indikator diletakkan di dalam kemasan dengan menempel pada permukaan plastik kemasan yang digunakan sebagai penutup kemasan. Buah alpukat disimpan pada kondisi suhu kamar dengan paparan cahaya normal. Pengamatan yang dilakukan pada buah alpukat diambil pada interval waktu yang tepat (setiap 2 hari sekali selama 12 hari) yaitu pada hari ke-0, 2, 4, 6, 8, 10, dan 12 dengan parameter pH, total asam, vitamin C, total padatan terlarut dan tingkat kekerasan. Indeks warna pada label indikator kemasan buah alpukat juga diamati setiap 2 hari sekali selama 12 hari. *Prototype* kemasan dapat dilihat pada Gambar 3 dan diagram alir validasi plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen dan label indikator pada buah alpukat dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. *Prototype* kemasan



Gambar 4. Diagram alir validasi plastik *biodegradable* dan label indikator buah alpukat

2.4. Desain Penelitian

Desain pada penelitian ini yaitu label indikator tanpa penyerap oksigen dan dengan penyerap oksigen sebagai kemasan aktif.

A0 : Label indikator + Plastik LDPE (tanpa penyerap oksigen)

A1 : Label indikator + Plastik *biodegradable* (PLA) tanpa penyerap oksigen

A2 : Label indikator + Plastik *biodegradable* berpenyerap oksigen (PLA + AG : AA ; 2,5% : 5%)

Pengamatan buah alpukat yang dikemas dengan kemasan cerdas dan aktif dilakukan sebanyak tiga (3) kali ulangan pada suhu ruang setiap 2 hari sekali selama 12 hari.

2.5. Parameter Pengamatan

Uji parameter pengamatan buah alpukat meliputi uji pH, total asam, vitamin C, total padatan terlarut dan tingkat kekerasan. Uji parameter pengamatan kemasan aktif meliputi uji permeabilitas oksigen, uji *biodegradable*, uji kuat tarik, uji elongasi, uji ketebalan plastik, uji SEM, uji XRD dan uji FTIR. Uji parameter pengamatan indikator label cerdas meliputi kuantifikasi perubahan warna indikator cerdas.

2.6. Parameter Pengamatan Buah Alpukat

a. Uji pH

Pengukuran pH dilakukan untuk mengukur pH awal dan akhir selama penyimpanan buah alpukat, pH meter yang digunakan adalah pH meter digital (*Horiba Laquatwin Compact pH Meter P-33*) dengan akurasi 0,01%. Sebanyak 1 g sampel dihaluskan, lalu dilarutkan dalam 10 ml Aquades. Setelah itu, dimasukkan pada permukaan sensor pH meter hingga nilai pH sampel tertera di layar pH meter.

b. Total Asam (Kasim et al., 2024)

Pengukuran total asam dengan metode titrasi dengan cara 25 ml suspensi ditambah 2-3 tetes indikator fenolphthalein, kemudian dititrasi dengan larutan NaOH 0.1N hingga warna berubah menjadi warna merah muda dan warna tersebut tidak berubah kembali selama 30 detik. Pada akhir titrasi di hitung jumlah NaOH yang digunakan:

$$\text{Total Asam (\%)} = \frac{(\text{ml NaOH} \times N \text{ NaOH} \times FP \times 134)}{\text{berat sampel (gram)}} \times 100\%$$

Keterangan:

ml NaOH	: Volume NaOH yang terpakai pada titrasi
N NaOH	: 0,1 Normalitas
FP	: Faktor Pengenceran (100/25)
134	: faktor asam dominan
Gram	: berat sampel

c. Vitamin C (Kasim et al., 2024)

Analisis Pengujian vitamin C dilakukan dengan menggunakan metode iodimetri (titrasi langsung dengan larutan baku iodium 0,01 N). Analisis vitamin C buah alpukat dilakukan dengan cara sampel ditimbang sebanyak 10 gram, kemudian sampel diencerkan dengan menggunakan aquades sampai tanda batas 100 ml pada labu ukur, selanjutnya dikocok sampai homogen, lalu larutan alpukat dipindahkan ke dalam erlenmeyer sebanyak 25 ml, kemudian ditambahkan indikator amilum 1% sebanyak 2-3 tetes, lalu dilakukan titrasi dengan larutan iodium 0,01 N sampai terjadi perubahan warna menjadi biru. Pada akhir titrasi di hitung jumlah iod yang digunakan.

$$\text{Vitamin C (\%)} = \frac{\text{ml iod} \times 0,88 \times \text{FP}}{\text{berat sampel (gram)}} \times 100\%$$

Keterangan :

ml iod : volume larutan iod yang digunakan

0,88 : faktor asam askorbat

FP : faktor pengenceran (100/25)

Gram : berat sampelin C.

d. Total Padatan Terlarut (Iskandar Pah et al., 2020)

Total padatan terlarut diukur menggunakan *refraktometer Atago 3810 tipe handheld* dengan tingkat ketelitian 0,1. Daging buah terlebih dahulu dihaluskan dengan cara ditumbuk, kemudian sarinya diambil untuk dijadikan sampel uji. Sampel tersebut kemudian ditetaskan pada prisma refraktometer, hasil dapat dilihat pada display alat yang dinyatakan dalam °Brix. Alat dibersihkan dengan aquades serta dikalibrasi sebelum dan sesudah digunakan.

e. Tingkat Kekerasan (Iskandar Pah et al., 2020)

Total Pengukuran tingkat kekerasan dilakukan menggunakan alat *Rheometer tipe CR 300 DX*, dengan kecepatan penekanan sebesar 30 mm per menit, beban maksimum 2 kg, dan kedalaman tusukan 10 mm. Proses pengukuran dilakukan dengan menusukkan alat pada buah alpukat sebanyak tiga kali di titik yang berbeda. Hasil pengukuran kekerasan buah alpukat ditampilkan dalam satuan kilogram gaya (kgf).

2.7. Parameter Pengamatan Kemasan Aktif

a. Pengujian Permeabilitas Oksigen (Liu et al., 2019)

Permeabilitas oksigen pada plastik biodegradable dianalisis dengan menggunakan metode adsorpsi zat deoksidasi, pertama siapkan botol kaca yang akan diisi natrium klorida, karbon aktif serta serbuk besi tereduksi masing-masing menggunakan perbandingan 1,5% : 1% : 0,5% dengan total keseluruhan sebanyak 3 gram, kemudian bungkus bibir botol menggunakan sampel bioplastik dengan ukuran 6 X 6 cm dan ditutup dengan plastisin. Selanjutnya botol akan ditimbang sebagai nilai berat awal, lalu botol yang sudah ditimbang kemudian dimasukkan ke dalam desikator yang didalamnya telah diisi larutan jenuh barium klorida pada bagian bawah desikator,

kemudian simpan pada suhu $\pm 25^{\circ}\text{C}$ selama 48 jam. Nilai permeabilitas oksigen dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P = \frac{\Delta m}{A \times t}$$

Keterangan :

Mf = Berat akhir botol

Mi = Berat awal botol

t = waktu keseimbangan (s)

A = Luas Efektifitas plastik (mm^2)

- b. Pengujian Biodegradable (Ghobashy et al., 2023; J. Lee et al., 2024; Qiang et al., 2024)

Pengujian biodegradable dilakukan menggunakan metode soil burial test, yaitu dengan menanam plastik biodegradable ke dalam tanah. Sampel plastik dipotong dengan ukuran 2 X 2 cm setelah itu plastik ditimbang lalu ditanam pada tanah kompos dengan kedalam sekitar $\pm 7,5$ cm, kemudian dilakukan inkubasi selama 10 pekan. Pengamatan sampel dilakukan dua pekan sekali dengan cara mengambil plastik dari dalam tanah, selanjutnya plastik biodegradable dibersihkan dari sisa tanah kemudian ditimbang. Nilai penurunan bobot plastik dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100\%$$

Keterangan :

Wi = Bobot awal plastik sebelum ditanam

Wt = Bobot akhir plastik sesudah ditanam

- c. Pengujian Kekuatan Tarik (Hasan et al., 2020; Sour Rudabadi et al., 2023)

Pengujian kekuatan tarik plastik menggunakan alat yang disebut tension testing. Sampel plastik dipotong dengan ukuran 1 x 15 cm, lalu plastik tersebut dijepit pada kedua sisinya. Selanjutnya tekan tombol knob start pada alat testing kemudian tunggu hingga plastiknya putus. Nilai kuat tarik serta panjang plastik setelah putus dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{F_{maks}}{A}$$

keterangan :

σ = Kuat tarik

Fmaks = Gaya tarik/tegangan maksimum (N)

A = Luas penampang lintang (tebal X lebar sampel) (mm^2)

- d. Pengujian Elongasi (Hasan et al., 2020; Paudel et al., 2023)

Pengujian elongasi plastik dengan alat tension testing. Sampel plastik dipotong ukuran 1 X 15 cm lalu kedua sisi dijepit pada alat tension testing. Kemudian tekan tombol knob start pada alat dan tunggu hingga plastik putus. Selanjutnya dicatat nilai gaya kuat tarik serta panjang plastik setelah putus. Nilai yang diperoleh dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\%$$

Keterangan :

- ε = Elongasi/regangan (%)
- Δl = Pertambahan Panjang (cm)
- l_0 = Panjang awal sampel (cm)

- e. Pengujian Ketebalan (Wan Yahaya et al., 2023) (Hasan et al., 2020; Souri Rudabadi et al., 2023)

Pengujian ketebalan plastik biodegradable dilakukan dengan cara memotong plastik dengan ukuran 10 x 10 cm, kemudian diukur tingkat ketebalannya pada keempat sisi menggunakan mikrometer sekrup dengan ketelitian 0.01 mm. Pengukuran dari keempat sisi dirata-ratakan sebagai nilai ketebalan plastik.

- f. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) (Borelbach et al., 2023; Kalita et al., 2021)

Pengujian *scanning electron microscope* dilakukan dengan menggunakan alat SEM (Vega3, Tescan GmbH, Dormunt, Jerman) dengan menggunakan tegangan akselerasi 20 kV dan detektor elektron sekunder (SED). Plastik yang bersifat tidak menghantarkan listrik maka ditambahkan lapisan logam yang dapat menghantarkan listrik dengan menggunakan logam emas atau *sputter coater* (Cressington 108, Cressington, Dormun, Jerman) selama 180 detik pada 30 Ma.

- g. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) (Rumengan, 2017)(Hasan et al., 2020; Souri Rudabadi et al., 2023)

Difraktometer yang digunakan adalah XRD Shimadzu 6000, dengan sumber target Cu yang memiliki panjang gelombang 1.5406 Å. Sampel disiapkan sebanyak 2 g, kemudian dimasukkan ke dalam holderyang berukuran (2×2) cm² pada difraktometer. Sudut awal diambil pada 10° dan sudut akhir pada 70° dengan kecepatan pembacaan 2° per menit.

- h. Pengujian *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) (Hardiyanti, 2016)

Disiapkan sampel berupa kristal/powder hidroksiapatit, ditumbuk hingga memenuhi ukuran partikel kurang dari 2 µm, kemudian dimasukkan ke dalam pelet press secara merata. Pellet press dihubungkan ke pompa kompersi *hydraulic* dengan kekuatan 100 ton (kg newton) serta pompa vakum selama 15 menit. Diusahakan pellet yang terbentuk mempunyai ketebalan 0,3 mm (transparan), selanjutnya dibuka pellet secara hati-hati dan dipindahkan ke dalam sel holder menggunakan spatula. Setelah itu diatur alat *Spektrofotometer Infra Red* dengan kecepatan kertas pada posisi “normal” dan ekspansi transmisi “100 x”. Dicek skala kertas melalui pembuatan spektrum dari filmpolystiren. Apabila skala kertas sudah tepat, dengan cara yang sama dibuat spektrum Infra Merah dari sampel yang sudah disiapkan, kemudian tentukan dan analisa gugus-gugus fungsinya.

2.8. Parameter Pengamatan Label Indikator Cerdas

a. Kuantifikasi Pengukuran Warna Indikator Cerdas (Ramadhani, 2016)

Pengukuran warna label indikator cerdas dianalisa menggunakan *colorimeter*. Kuantifikasi warna label indikator dilakukan dengan menempelkan sensor *colorimeter* pada label indikator cerdas. Alat kemudian akan menunjukkan nilai L, a, dan b pada display. Selanjutnya, untuk nilai L, a, dan b dimasukkan ke *software Corel Draw* untuk memperoleh perubahan warna label indikator yang dapat dilihat secara visual selama penyimpanan. Ketiga nilai tersebut merupakan standar internasional pengukuran warna yang diterbitkan oleh *Hunterlab Association Laboratory* (2008).

2.9. Tingkat Hubungan (Korelasi) antar Parameter Pengujian

Data kuantifikasi label indikator cerdas akan dibandingkan dengan data setiap parameter penurunan mutu buah alpukat dan disajikan dalam satu grafik menggunakan *software Sigma Plot* versi 14.0.

2.10. Analisis Data

Hasil dari data pengujian dianalisa dengan analisis sidik ragam atau *analysis of variances* (ANOVA), jika hasil pengujian berbeda nyata maka dilakukan uji lanjut metode *Duncan test* pada uji permeabilitas oksigen, biodegradable, kuat tarik, elongasi, ketebalan, nilai pH, total asam, vitamin C, total padatan terlarut, tingkat kekerasan dan nilai °Hue. Hubungan (korelasi) parameter warna indikator cerdas terhadap semua parameter penurunan mutu buah alpukat disajikan dalam satu grafik menggunakan *software Sigma Plot* dengan versi 14.0. Semua pengolahan data menggunakan SPSS 22 dan *Microsoft Excel* 2017.