

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Industri makanan mulai memprioritaskan pengembangan pengemasan karena berbagai alasan. Pertama, bertujuan untuk mengawetkan makanan secara efektif dan meminimalkan limbah kemasan, sekaligus memastikan produksi produk berkualitas tinggi dengan umur simpan lebih lama. Dalam dekade terakhir, pengemasan cerdas semakin mendapat perhatian dalam industri makanan (Ahmed et al., 2018; H. Guo et al., 2023) . Sektor pengemasan makanan telah berkembang secara dramatis dengan menggunakan teknologi pengemasan makanan yang ingin meminimalkan kontaminasi dan jumlah makanan yang terbuang serta memasoknya dengan aman, nyaman, dan berkualitas tinggi. Menurut Food Waste Index, lebih dari 17% limbah makanan dibuang setiap tahun, yang menyumbang hampir 10% emisi gas global. (Abu-Thabit et al., 2020; Havelaar et al., 2015)

Praktik pengemasan dan penyimpanan makanan yang salah atau tidak memadai adalah salah satu penyebab limbah makanan. Sekitar sepertiga makanan di dunia terbuang di sepanjang proses suplai, yang sebagian besar disebabkan oleh produk makanan yang mudah rusak dan kadaluwarsa tidak lama setelah diproduksi. Beberapa alasan yang mempengaruhi umur simpan makanan termasuk kontaminasi mikroba, degradasi enzimatis, oksidasi, etilen, yang berlebihan, suhu yang tidak terkontrol, dan sebagainya (Adiani et al., 2021; Ahad & Gull, 2023; Mutmainna et al., 2024). Dengan demikian, pengembangan metode pengawetan yang sangat efisien untuk memperpanjang umur simpan sangat penting untuk mengurangi limbah makanan. Berbagai pendekatan telah dikembangkan dan diproduksi untuk memperpanjang umur simpan makanan, seperti pendinginan, pra-pengawet, pengawetan lapisan, pengawetan vakum, dan pengemasan aktif. Dibandingkan dengan yang lain, pengemasan aktif adalah konsep yang relatif baru yang dirancang untuk melepaskan atau menyerap zat ke dalam atau dari makanan yang dikemas ke lingkungan (Bao et al., 2022; Becerril et al., 2021)

Saat ini, pengembangan film kemasan pintar berdasarkan pigmen alami seperti (klorofil, karetonoid, kurkumin, betalain, dan antosianin) telah mendapat perhatian yang semakin meningkat di bidang pengemasan makanan [(Abdo et al., 2024; Ahmad et al., 2023)]. Di antara berbagai pigmen alami, antosianin telah paling banyak digunakan dalam film kemasan pintar. Antosianin sendiri merupakan senyawa fenolik yang memberikan warna ungu, biru, dan merah pada sayuran dan buah-buahan (Han & Song, 2021; K.

Zhang et al., 2020) . Selain itu antosianin adalah zat yang sensitif terhadap pH yang dapat mengubah struktur molekul dan warnanya dengan variasi pH. Sensitivitas pH antosianin memungkinkan untuk memantau kualitas makanan secara real time. Sementara itu antosianin merupakan komponen aktif yang memiliki kemampuan antioksidan dan antimikroba, yang bermanfaat untuk memperpanjang masa simpan makanan (Abedi-Firoozjah et al., 2022; Berenji Ardestani et al., 2016; Han & Song, 2021; Neves et al., 2022; Yun et al., 2019)

Kemasan cerdas (smart packaging) telah menjadi fokus utama dalam industri makanan dan farmasi karena kemampuannya untuk meningkatkan keamanan, kualitas, dan umur simpan produk. Salah satu material yang menjanjikan untuk pengembangan kemasan cerdas adalah kombinasi Polyvinyl Alcohol (PVA) dan Chitosan (Almasi et al., 2022; Ghareaghajlou et al., 2021) PVA dikenal karena sifat mekanisnya yang baik dan kompatibilitas dengan berbagai bahan aditif, sedangkan Chitosan, yang merupakan biopolimer alami, memiliki sifat anti-mikroba dan biodegradabilitas yang tinggi. Namun, tantangan utama dalam penggunaan material ini adalah bagaimana meningkatkan sifat fungsionalnya agar lebih efektif dalam melawan kontaminasi mikroba dan memperpanjang masa simpan produk (Bhargava et al., 2020; Ganeson et al., 2023; Qin et al., 2021; S. Wang et al., 2019).

Penambahan Copper Metal-Organic Frameworks (Cu-MOF) ke dalam matriks PVA/Chitosan diharapkan dapat memberikan solusi inovatif. Cu-MOF memiliki struktur poros yang unik dan sifat anti-mikroba yang kuat, sehingga dapat meningkatkan kinerja kemasan dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan menjaga kualitas produk (Cun et al., 2022; Huang et al., 2024; Khan et al., 2023) .

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji performa smart packaging berbahan dasar PVA/Chitosan dengan penambahan Cu-MOF, serta mengevaluasi sifat mekanis, fungsional, biodegradabilitas, dan keamanan penggunaannya. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi kemasan yang lebih aman, efektif, dan ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana mengembangkan kemasan pintar berbahan dasar PVA-Chitosan dengan penambahan Antosianin/Cu-MOF untuk meningkatkan sifat antioksidan dan antimikroba?

- b. Bagaimana memantau dan menunjukkan kualitas produk pangan secara real-time menggunakan kemasan pintar PVA-chitosan dengan antosianin dan CU-MOF?
- c. Bagaimana stabilitas material smart packaging dalam kondisi penyimpanan yang berbeda-beda?

1.3 Tujuan Penelitian

- a. Mengembangkan kemasan pintar untuk meningkatkan sifat antioksidan dan antimikroba kemasan yang ramah lingkungan!
- b. Mengembangkan kemasan pintar yang mampu memantau dan menunjukkan kualitas produk pangan secara real-time!
- c. Menganalisis stabilitas material smart packaging dalam kondisi penyimpanan yang berbeda-beda .

1.4 Manfaat Penelitian

- a. Memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi kemasan cerdas yang lebih efektif dan efisien untuk industri makanan.
- b. Meningkatkan keamanan pangan dengan mengurangi risiko kontaminasi mikroba pada produk makanan yang dikemas.
- c. Menyediakan alternatif bahan kemasan yang lebih ramah lingkungan dan biodegradable.
- d. Mengurangi pemborosan makanan dengan memperpanjang masa simpan produk melalui penggunaan smart packaging.
- e. Memberikan nilai ekonomis bagi produsen dan konsumen dengan mengurangi kerugian akibat produk makanan yang rusak atau terkontaminasi.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini berfokus pada pengembangan kemasan cerdas (smart packaging) yang memanfaatkan bahan dasar PVA (polyvinyl alcohol) dan kitosan, dengan penambahan antosianin dan Cu-MOF (Copper Metal-Organic Framework). PVA dan kitosan dipilih karena sifatnya yang biokompatibel, biodegradabel, dan ramah lingkungan, menjadikannya material yang ideal untuk aplikasi kemasan makanan. Penambahan antosianin, senyawa pigmen alami yang diperoleh dari tumbuhan, memberikan fungsi indikator pH pada kemasan, yang mampu mendeteksi perubahan kualitas makanan melalui perubahan warna. Cu-MOF, material berpori dengan kemampuan adsorpsi yang tinggi, berfungsi sebagai agen antimikroba yang efektif dalam memperpanjang umur simpan makanan. Ruang lingkup penelitian ini mencakup sintesis dan karakterisasi material komposit PVA/kitosan dengan antosianin dan Cu-MOF,

evaluasi sifat mekanik dan fisik dari kemasan yang dihasilkan, serta uji kinerja fungsionalnya dalam mendeteksi dan memperpanjang kesegaran produk makanan. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat dihasilkan kemasan cerdas yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga mampu memberikan nilai tambah dalam menjaga kualitas dan keamanan produk makanan.

1.6 Kebaruan Penelitian

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada integrasi bahan-bahan PVA, kitosan, antosianin, dan Cu-MOF dalam satu sistem kemasan cerdas yang multifungsi. Penggunaan kombinasi ini belum banyak diteliti sebelumnya, terutama dalam konteks kemasan makanan. Antosianin berperan sebagai indikator pH alami yang memberikan kemampuan deteksi visual terhadap perubahan kualitas makanan, sementara Cu-MOF menawarkan sifat antimikroba yang kuat untuk memperpanjang umur simpan produk. Pendekatan ini tidak hanya menggabungkan aspek keamanan dan kualitas makanan tetapi juga menekankan pada keberlanjutan dengan menggunakan bahan-bahan yang biodegradable dan ramah lingkungan. Penelitian ini membuka jalan bagi pengembangan kemasan cerdas yang lebih efisien dan efektif, serta mendukung tren global menuju praktik yang lebih ramah lingkungan dalam industri kemasan makanan.

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei 2024-Oktober 2024, di Laboratorium Fisika Material dan Energi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat yang digunakan

- a. Gelas Kimia
- b. Pipet Tetes
- c. Gelas Ukur
- d. Magnetit Stirrer
- e. Sentrifugasi
- f. Kertas Saring Wattman, No. 42
- g. Magnetit Bar
- h. Cetakan Plastik 5 cm x 5 cm
- i. pH meter
- j. Ball milling
- k. Microwave
- l. Aluminium Voil

2.2.2 Bahan yang digunakan

- a. Kubis Merah (*red Cabbage*)
- b. NaOH
- c. HCl
- d. Etanol
- e. Asam Tereftalat
- f. Chitosan
- g. Asam Asetat
- h. Aquades
- i. Cu (*Copper*)
- j. Polivinil Alkohol (PVA)

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Sintesis Cu-MOF

MOF berbasis tembaga-Asam Tereftalat (Cu-MOF) disintesis dengan menggunakan pendekatan non konvensional (*mechanochemical method*). Logam Cu dan Asam tereftalat di mixing selama 60 menit dengan frekuensi 10 Hz menggunakan ball milling tanpa menggunakan solven (pelarut). Setelah di milling campuran kemudian dapat dicuci dengan pelarut untuk menghilangkan residu dan meningkatkan kemurnian, campuran logam kemudian dipanaskan perlahan pada suhu 70°C untuk menguapkan air atau molekul volatil lainnya yang terbentuk.

2.3.2 Ekstraksi Antosianin

Antosianin diekstraksi dari kubis merah menggunakan ekstraksi padat-cair yang umum dilakukan. Kubis merah (*red cabbage*) dibersihkan dengan air suling dan dipotong kecil-kecil, kemudian dihaluskan menggunakan blender hingga membentuk pulp. Pulp yang dihasilkan kemudian direndam menggunakan etanol dengan perbandingan 1:4 dan didiamkan selama 3 hari pada suhu ruang, dalam proses pendiaman dilakukan 1 kali pengadukan selama 30 detik. Hasil ekstrak kemudian disaring untuk pemisahan ampas dan ekstrak antosianin, kemudian dipanaskan pada suhu 60°C untuk memperoleh ekstrak antosianin yang lebih pekat.

Hasil ekstrak antosianin kemudian ditambahkan dengan larutan buffer berupa HCl dan NaOH untuk memperoleh nilai pH yang bervariasi, hasil tersebut kemudian di karakterisasi menggunakan UV-Vis untuk mengetahui nilai absorbansi tiap larutan.

2.3.2 Prosedur Pembuatan Film

1. Sintesis PVA

Pertama, larutan PVA diproduksi dengan melarutkan 5 gram PVA dalam 100 mL air aquades, kemudian di stirrer pada suhu 120 °C dengan kecepatan 400 rpm selama 4 jam.

2. Sintesis Chitosan (Cs)

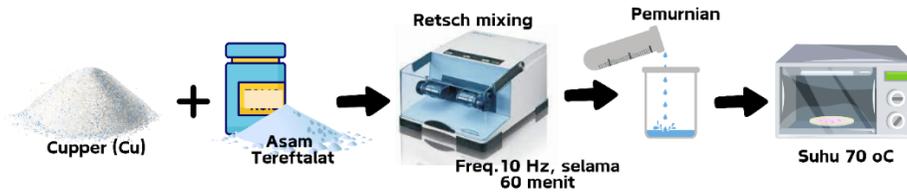
Larutan chitosan dibuat dengan menambahkan 1 gram chitosan dan asam asetat kemudian di stirrer dengan kecepatan 200 rpm, hingga membentuk larutan chitosan.

3. PVA-Chitosan/Antosianin/Cu-MOF

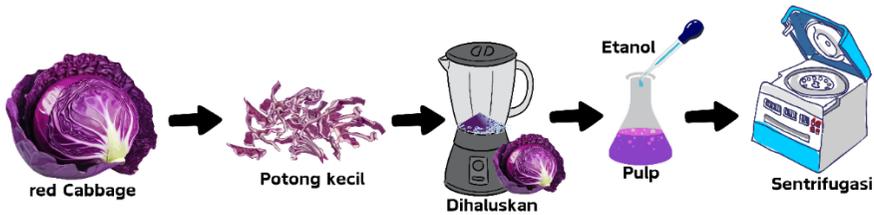
Larutan PVA kemudian ditambahkan dengan larutan chitosan kemudian di stirrer pada kecepatan 300 rpm pada suhu ruang hingga larutan tercampur dengan baik, selama ± 10 menit, setelah itu larutan PVA-Chitosan kemudian ditambahkan dengan ekstrak antosianin dan Cu-MOF, yang kemudian dilakukan pengadukan kembali dengan kecepatan yang sama selama ± 5

menit. Larutan PVA-Chitosan/Cu-MOF dituang ke dalam cetakan yang telah disediakan, kemudian dipanaskan pada suhu 70°C selama 30 menit menggunakan microwave.

Sintesis Cu-MOF

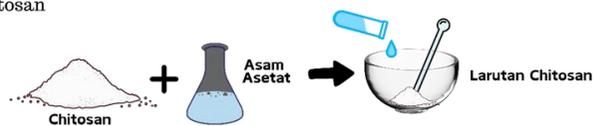


Ekstraksi Antosianin

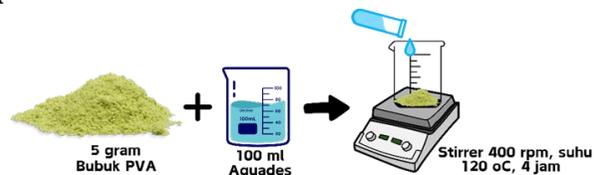


Gambar 1. Proses Sintesis Cu-MOF dan Ekstrak Antosianin

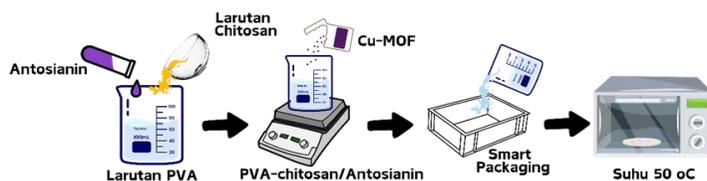
Sintesis Chitosan



Sintesis PVA



Sintesis Smart Packaging



Gambar 2. Proses Pembuatan Smart Packaging

2.3.4 Karakterisasi dan Pengujian

a. Karakterisasi

X-Ray Diffraction Shimadzu 7000 dengan radiasi $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=0.15405$ nm atau 1.5405 Å) pada sudut jangkauan $20^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$ operasi pada 30 kV dan 10 mA. XRD digunakan untuk mengidentifikasi struktur atom dan ukuran kristal material menggunakan rumus Debye Scherrer. Karakterisasi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* menggunakan Shimadzu IR Prestige-21 pada rentang bilangan gelombang $500\text{-}4000$ cm^{-1} . FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi material. UV-Vis digunakan untuk mengetahui nilai absorbansi dari bahan. SEM (Scanning Electron Microscopy) memberikan gambaran rinci tentang morfologi dan tekstur permukaan kemasan cerdas. Hal ini membantu dalam mengidentifikasi keberadaan fitur-fitur mikroskopis seperti pori-pori, retakan, atau pola permukaan yang spesifik.

b. Pengujian

2.4 Uji aktivitas Antibakteri

Metode pengujian ini dilakukan menggunakan metode difusi kertas cakram, yaitu dengan menggunakan pinset steril, kertas cakram diletakkan di atas lempeng media Nutrien Agar yang telah dicampur dengan bakteri *E. coli*. Sebelumnya kertas cakram ditetesi dengan larutan uji ekstrak etanol daun katuk sebanyak 2 tetes dengan konsentrasi (5%, 10%, 20%, 40%, 80%), larutan CMC 1% sebagai kontrol negatif, disk Ciprofloxasin, Gentamisin, dan basitrasin sebagai pembanding. Cawan petri kemudian diinkubasi dalam inkubator selama 24 jam pada suhu 37°C .

2.5 Uji Tarik (*Tensile Strength*)

Pengujian kuat tarik bioplastik dilakukan dengan menggunakan alat uji tarik *strength ZP Recorder 50 N Imada*. Hasil data jarak yang ditempuh penarik dari awal hingga sampel putus, diukur dan dicatat pada software pencatat data untuk diolah dan analisa. Nilai kuat tarik pada sampel bioplastik dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\Sigma = \frac{F_{maks}}{A} \quad (1)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} \Sigma &= \text{Kuat Tarik (N/m}^2\text{)} \\ F_{maks} &= \text{Gaya Tarik Maksimum (N)} \\ A &= \text{Luas Penampang} \end{aligned}$$

2.6 Uji Kesegaran Makanan

Memastikan bahwa makanan yang dikonsumsi tetap dalam kondisi baik dan aman untuk dikonsumsi. Produk makanan ditempatkan dalam kemasan cerdas dan kemudian disimpan pada kondisi tertentu. Perubahan warna atau indikator pada kemasan dicatat untuk mengevaluasi kesegaran produk.

2.7 Uji AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*)

Pengujian AAS bertujuan untuk menganalisis kandungan logam dalam sampel kemasan tersebut, mengukur konsentrasi tembaga dalam kemasan cerdas, memastikan bahwa konsentrasi logam tersebut berada pada tingkat yang diinginkan dan aman.

2.8 Uji Degradasi

Pengujian degradasi pada sampel smart packaging berbahan dasar PVA-chitosan dengan penambahan antosianin dan Cu-MOF bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas material dalam kondisi tertentu serta memahami mekanisme degradasi yang terjadi. Kombinasi PVA (polyvinyl alcohol) dan chitosan memberikan sifat biodegradabilitas alami yang dapat terurai di lingkungan, sementara antosianin, sebagai senyawa bioaktif, berfungsi sebagai indikator perubahan pH yang mencerminkan kualitas produk yang dikemas. Penambahan Cu-MOF (Metal-Organic Framework berbasis tembaga) meningkatkan stabilitas struktural dan sifat fungsional, seperti kapasitas adsorpsi dan aktivitas antimikroba.

Pengujian degradasi dilakukan melalui simulasi kondisi lingkungan tertentu, seperti paparan cahaya, kelembapan, dan suhu yang tinggi, yang umumnya dialami selama penyimpanan produk. Parameter degradasi diukur melalui perubahan sifat fisik dan kimia material, seperti penurunan berat, kehilangan kekuatan mekanis, atau perubahan warna akibat reaksi antosianin terhadap perubahan pH. Hasil dari pengujian ini memberikan informasi mengenai waktu paruh material, tingkat kerusakan dalam berbagai kondisi lingkungan, serta efektivitas kombinasi antosianin dan Cu-MOF dalam memperlambat laju degradasi. Dengan demikian, studi ini berkontribusi pada pengembangan material smart packaging yang tidak hanya fungsional tetapi juga ramah lingkungan dan memiliki kinerja optimal dalam aplikasi nyata.

Pengujian degradasi material smart packaging berbahan dasar PVA-chitosan dengan penambahan antosianin dan Cu-MOF menggunakan media tanah dilakukan untuk mengevaluasi biodegradabilitas material. Sampel dipotong dalam ukuran seragam, ditimbang untuk mendapatkan berat awal, dan ditanam di media tanah pada kedalaman tertentu. Selama periode pengujian, sampel diambil secara berkala, dicuci,

dikeringkan, dan ditimbang kembali untuk mengukur penurunan berat akibat degradasi. Persentase degradasi dihitung menggunakan formula:

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

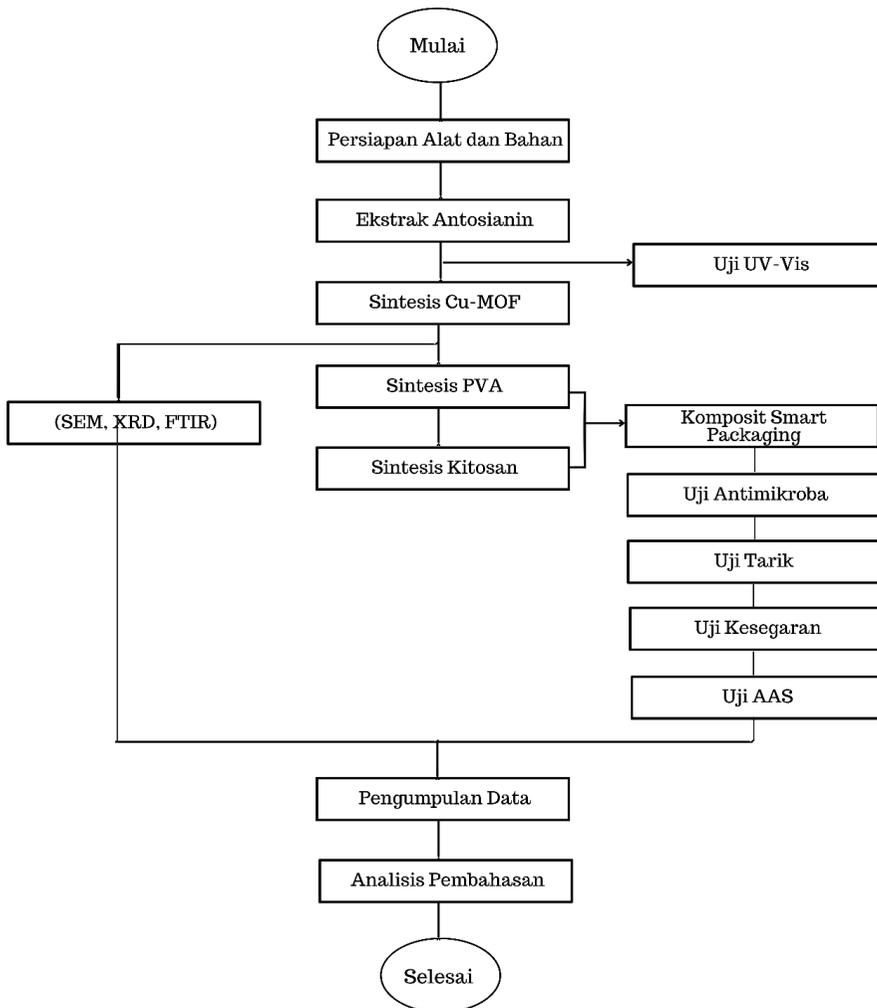
Keterangan :

C_0 = Berat sampel mula – mula

C_1 = Berat sampel setelah proses degradasi

Pengamatan ini dilakukan selama 7 hari menggunakan media tanah, dan dilakukan pengamatan setiap harinya.

2.5 Bagan Alir



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian

BAB II

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei 2024-Oktober 2024, di Laboratorium Fisika Material dan Energi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat yang digunakan

- m. Gelas Kimia
- n. Pipet Tetes
- o. Gelas Ukur
- p. Magnetit Stirrer
- q. Sentrifugasi
- r. Kertas Saring Wattman, No. 42
- s. Magnetit Bar
- t. Cetakan Plastik 5 cm x 5 cm
- u. pH meter
- v. Ball milling
- w. Microwave
- x. Aluminium Voil

2.2.2 Bahan yang digunakan

- k. Kubis Merah (*red Cabbage*)
- l. NaOH
- m. HCl
- n. Etanol
- o. Asam Tereftalat

- p. Chitosan
- q. Asam Asetat
- r. Aquades
- s. Cu (*Copper*)
- t. Polivinil Alkohol (PVA)

2.4 Prosedur Penelitian

2.3.1 Sintesis Cu-MOF

MOF berbasis tembaga-Asam Tereftalat (Cu-MOF) disintesis dengan menggunakan pendekatan non konvensional (*mechanochemical method*). Logam Cu dan Asam tereftalat di mixing selama 60 menit dengan frekuensi 10 Hz menggunakan ball milling tanpa menggunakan solven (pelarut). Setelah di milling campuran kemudian dapat dicuci dengan pelarut untuk menghilangkan residu dan meningkatkan kemurnian, campuran logam kemudian dipanaskan perlahan pada suhu 70°C untuk menguapkan air atau molekul volatil lainnya yang terbentuk.

2.3.3 Ekstraksi Antosianin

Antosianin diekstraksi dari kubis merah menggunakan ekstraksi padat-cair yang umum dilakukan. Kubis merah (*red cabbage*) dibersihkan dengan air suling dan dipotong kecil-kecil, kemudian dihaluskan menggunakan blender hingga membentuk pulp. Pulp yang dihasilkan kemudian direndam menggunakan etanol dengan perbandingan 1:4 dan didiamkan selama 3 hari pada suhu ruang, dalam proses pendiaman dilakukan 1 kali pengadukan selama 30 detik. Hasil ekstrak kemudian disaring untuk pemisahan ampas dan ekstrak antosianin, kemudian dipanaskan pada suhu 60°C untuk memperoleh ekstrak antosianin yang lebih pekat.

Hasil ekstrak antosianin kemudian ditambahkan dengan larutan buffer berupa HCl dan NaOH untuk memperoleh nilai pH yang bervariasi, hasil tersebut kemudian di karakterisasi menggunakan UV-Vis untuk mengetahui nilai absorbansi tiap larutan.

2.8.2 Prosedur Pembuatan Film

4. Sintesis PVA

Pertama, larutan PVA diproduksi dengan melarutkan 5 gram PVA dalam 100 mL air aquades, kemudian di stirrer pada suhu 120 °C dengan kecepatan 400 rpm selama 4 jam.

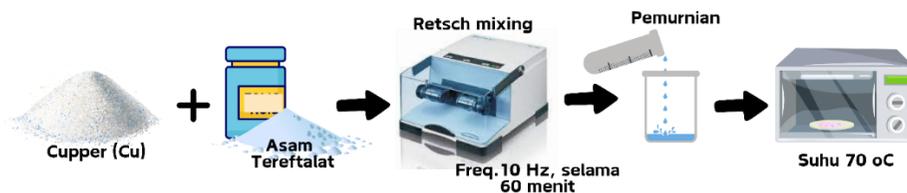
5. Sintesis Chitosan (Cs)

Larutan chitosan dibuat dengan menambahkan 1 gram chitosan dan asam asetat kemudian di stirrer dengan kecepatan 200 rpm, hingga membentuk larutan chitosan.

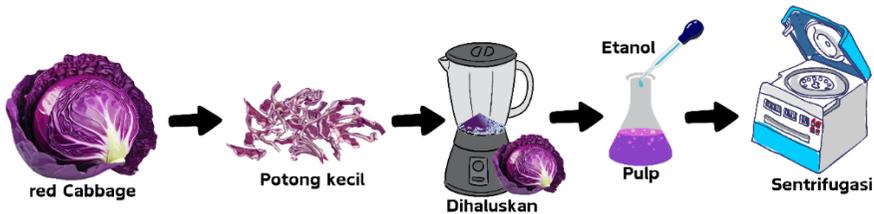
6. PVA-Chitosan/Antosianin/Cu-MOF

Larutan PVA kemudian ditambahkan dengan larutan chitosan kemudian di stirrer pada kecepatan 300 rpm pada suhu ruang hingga larutan tercampur dengan baik, selama ± 10 menit, setelah itu larutan PVA-Chitosan kemudian ditambahkan dengan ekstrak antosianin dan Cu-MOF, yang kemudian dilakukan pengadukan kembali dengan kecepatan yang sama selama ± 5 menit. Larutan PVA-Chitosan/Cu-MOF dituang kedalam cetakan yang telah disediakan, kemudian dipanaskan pada suhu 70°C selama 30 menit menggunakan microwave.

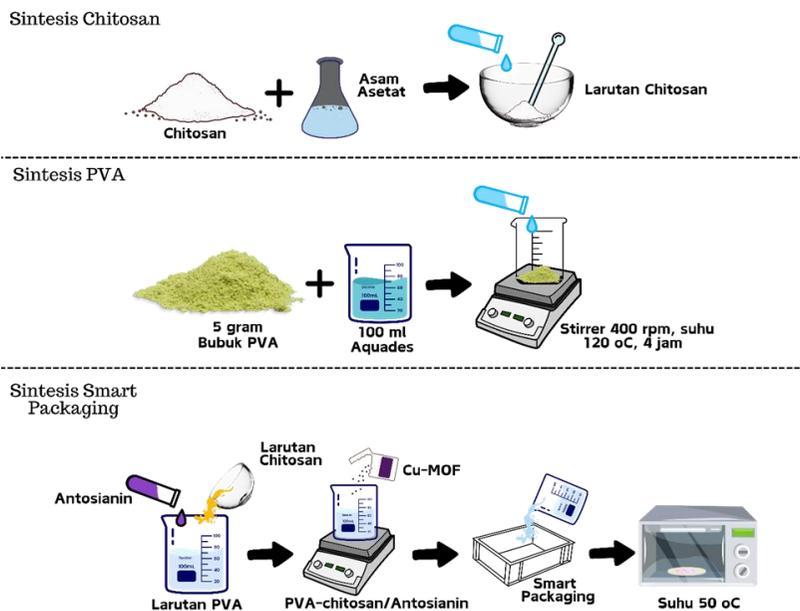
Sintesis Cu-MOF



Ekstraksi Antosianin



Gambar 4. Proses Sintesis Cu-MOF dan Ekstrak Antosianin



Gambar 5. Proses Pembuatan Smart Packaging

2.3.4 Karakterisasi dan Pengujian

a. Karakterisasi

X-Ray Diffraction Shimadzu 7000 dengan radiasi $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=0.15405$ nm atau 1.5405 Å) pada sudut jangkauan $20^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$ operasi pada 30 kV dan 10 mA. XRD digunakan untuk mengidentifikasi struktur atom dan ukuran kristal material menggunakan rumus Debye Scherrer. Karakterisasi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* menggunakan Shimadzu IR Prestige-21 pada rentang bilangan gelombang $500\text{--}4000$ cm^{-1} . FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi material. UV-Vis digunakan untuk mengetahui nilai absorbansi dari bahan. SEM (Scanning Electron Microscopy) memberikan gambaran rinci tentang morfologi dan tekstur permukaan kemasan cerdas. Hal ini membantu dalam mengidentifikasi keberadaan fitur-fitur mikroskopis seperti pori-pori, retakan, atau pola permukaan yang spesifik.

b. Pengujian

2.9 Uji aktivitas Antibakteri

Metode pengujian ini dilakukan menggunakan metode difusi kertas cakram, yaitu dengan menggunakan pinset steril, kertas cakram diletakkan di atas lempeng media Nutrien Agar yang telah dicampur dengan bakteri *E. coli*. Sebelumnya kertas cakram ditetesi dengan larutan uji ekstrak etanol daun katuk sebanyak 2 tetes dengan konsentrasi (5%, 10%, 20%, 40%, 80%), larutan CMC 1% sebagai kontrol negatif, disk

Ciprofloxasin, Gentamisin, dan basitrasin sebagai pembanding. Cawan petri kemudian diinkubasi dalam inkubator selama 24 jam pada suhu 37°C.

2.10 Uji Tarik (*Tensile Strength*)

Pengujian kuat tarik bioplastik dilakukan dengan menggunakan alat uji tarik *strength ZP Recorder 50 N Imada*. Hasil data jarak yang ditempuh penarik dari awal hingga sampel putus, diukur dan dicatat pada software pencatat data untuk diolah dan analisa. Nilai kuat tarik pada sampel bioplastik dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\Sigma = \frac{F_{maks}}{A} \quad (1)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} \Sigma &= \text{Kuat Tarik (N/m}^2\text{)} \\ F_{maks} &= \text{Gaya Tarik Maksimum (N)} \\ A &= \text{Luas Penampang} \end{aligned}$$

2.11 Uji Kesegaran Makanan

Memastikan bahwan makanan yang dikonsumsi tetap dalam kondisi baik dan aman untuk dikonsumsi. Produk makanan ditempatkan dalam kemasan cerdas dan kemudian disimpan pada kondisi tertentu. Perubahan warna atau indikator pada kemasan dicatat untuk mengevaluasi kesegaran produk.

2.12 Uji AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*)

Pengujian AAS bertujuan untuk menganalisis kandungan logam dalam sampel kemasan tersebut, mengukur konsentrasi tembaga dalam kemasan cerdas, memastikan bahwa konsentrasi logam tersebut berada pada tingkat yang diinginkan dan aman.

2.13 Uji Degradasi

Pengujian degradasi pada sampel smart packaging berbahan dasar PVA-chitosan dengan penambahan antosianin dan Cu-MOF bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas material dalam kondisi tertentu serta memahami mekanisme degradasi yang terjadi. Kombinasi PVA (polyvinyl alcohol) dan chitosan memberikan sifat biodegradabilitas alami yang dapat terurai di lingkungan, sementara antosianin, sebagai senyawa bioaktif, berfungsi sebagai indikator perubahan pH yang mencerminkan kualitas produk yang dikemas. Penambahan Cu-MOF (Metal-Organic Framework berbasis tembaga) meningkatkan stabilitas struktural dan sifat fungsional, seperti kapasitas adsorpsi dan aktivitas antimikroba.

Pengujian degradasi dilakukan melalui simulasi kondisi lingkungan tertentu, seperti paparan cahaya, kelembapan, dan suhu yang tinggi, yang umumnya dialami selama penyimpanan produk. Parameter degradasi diukur melalui perubahan sifat fisik dan kimia material, seperti penurunan berat, kehilangan kekuatan mekanis, atau perubahan warna akibat reaksi antosianin terhadap perubahan pH. Hasil dari pengujian ini memberikan informasi mengenai waktu paruh material, tingkat kerusakan dalam berbagai kondisi lingkungan, serta efektivitas kombinasi antosianin dan Cu-MOF dalam memperlambat laju degradasi. Dengan demikian, studi ini berkontribusi pada pengembangan material smart packaging yang tidak hanya fungsional tetapi juga ramah lingkungan dan memiliki kinerja optimal dalam aplikasi nyata.

Pengujian degradasi material smart packaging berbahan dasar PVA-chitosan dengan penambahan antosianin dan Cu-MOF menggunakan media tanah dilakukan untuk mengevaluasi biodegradabilitas material. Sampel dipotong dalam ukuran seragam, ditimbang untuk mendapatkan berat awal, dan ditanam di media tanah pada kedalaman tertentu. Selama periode pengujian, sampel diambil secara berkala, dicuci, dikeringkan, dan ditimbang kembali untuk mengukur penurunan berat akibat degradasi. Persentase degradasi dihitung menggunakan formula:

$$\% \text{ Degradasi} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

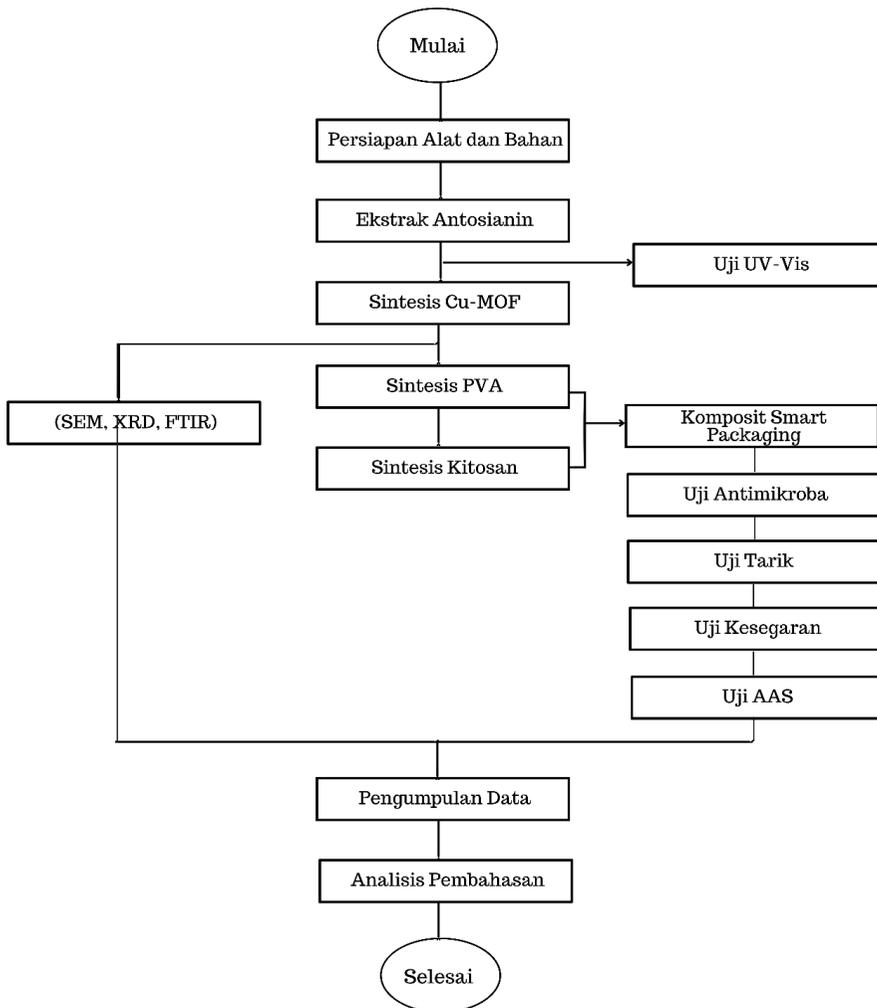
Keterangan :

C_0 = Berat sampel mula – mula

C_1 = Berat sampel setelah proses degradasi

Pengamatan ini dilakukan selama 7 hari menggunakan media tanah, dan dilakukan pengamatan setiap harinya.

2.5 Bagan Alir



Gambar 6. Bagan Alir Penelitian