

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI BIOPLASTIK MULTILAPIS
BERBASIS KITOSAN TERMODIFIKASI
DENGAN ALGINAT-GLISEROL**



SKRIPSI

**Disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan
memperoleh gelar sarjana**

**Oleh :
Jesaya Hansel
NIM. 24030121140112**

**Departemen Kimia
Fakultas Sains dan Matematika
Universitas Diponegoro
Semarang
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Penelitian : Sintesis dan Karakterisasi Bioplastik Multilapis
Berbasis Kitosan Termodifikasi dengan Alginat-
Gliserol
Nama : Jesaya Hansel
NIM : 24030121140112

Telah diuji dan dinyatakan lulus pada ujian sarjana tanggal 30 Juni 2025

Semarang, 30 Juni 2025

Menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Retno Ariadi Lusiana, S.Si., M.Si.
NIP. 19701202 199702 2 001



Didik Setiyo Widodo, S.Si., M.Si.
NIP. 19700521 199903 1 001

Mengetahui,
Ketua Departemen Kimia,



Prof. Adi Darmawan, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 19731121 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan penelitian tugas riset I yang berjudul “Sintesis dan Karakterisasi Bioplastik Multilapis Berbasis Kitosan Termodifikasi dengan Alginat-Gliseryl”. Penulis menyadari bahwa kesuksesan dalam pelaksanaan riset dan penulisan laporan ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Dr. Retno Ariadi Lusiana, S.Si., M.Si., selaku Dosen pembimbing I dan Didik Setiyo Widodo, S.Si., M.Si., selaku pembimbing II yang telah sabar dalam mengarahkan, membimbing, memberi saran, masukan, serta semangat selama penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak dan Ibu Dosen Kimia Fakultas Sains dan Matematika yang telah mengajarkan dan memberikan ilmu yang bermanfaat bagi hidup penulis dan dalam keberjalanan skripsi.
3. Ayahanda (alm.) dan ibunda serta abang tercinta penulis yang selalu memberikan doa tulus, cinta, kasih sayang, dan dukungan selama proses penyusunan skripsi ini berlangsung.
4. Mbak Dian selaku laboran laboratorium kimia analitik yang telah membantu dalam kelancaran kegiatan penelitian.
5. Teman riset seperjuangan (Azam, Chika, Siska, Alda, Ida) atas semangat dan kebersamaan dalam menyelesaikan penelitian serta banyak membantu penulis dalam keberjalanan skripsi ini.

6. Teman-teman laboratorium analitik dan kimia angkatan 2021 atas segala kebersamaan dan dukungan.
7. Semua pihak yang telah membantu dan mendoakan dalam keberjalanan skripsi ini dan tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritikan yang membangun. Semoga laporan ini dapat bermanfaat untuk pengembangan ilmu pengetahuan.

Semarang, 17 Juni 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR LAMBANG	xii
ABSTRAK	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Tujuan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 Plastik	6
II.2 Bioplastik.....	8
II.3 Kitosan.....	10
II.4 Poli(vinil alkohol) (PVA)	11
II.5 Natrium Alginat	13
II.6 Gliserol	15
II.7 <i>Sodium Tripolifosfat</i> (STPP).....	17
II.8 Kalsium Asetat dari Cangkang Telur	19

II.9	Mekanisme Ikatan Silang pada Sistem Alginat-Ion Kalsium.....	21
II.10	<i>Metode Layer-by-Layer (LBL)</i>	23
II.11	Karakterisasi Membran Bioplastik.....	24
II.11.1	Uji Berat dan Ketebalan.....	24
II.11.2	Uji kuat tarik dan elongasi	25
II.11.3	Uji Hidrofilisitas.....	26
II.11.4	Uji serap air	27
II.11.5	Uji Permeabilitas Uap Air.....	28
II.11.6	Uji Kadar Air	29
II.11.7	Uji Porositas.....	31
II.11.8	Uji Pengembangan	32
II.11.9	Uji Biodegradasi.....	33
II.11.10	Uji FTIR.....	35
II.11.11	Uji XRD	36
BAB III METODE PENELITIAN		38
III.1	Variabel Penelitian	38
III.1.1	Variabel Tetap.....	38
III.1.2	Variabel Berubah.....	38
III.1.3	Variabel Terukur	39
III.2	Bahan dan Alat.....	39
III.2.1	Bahan.....	39
III.2.2	Alat	40
III.3	Prosedur Penelitian.....	41

III.3.1	Sintesis Larutan Kalsium Asetat dari Cangkang Telur	41
III.3.2	Pembuatan Larutan CH_3COOH 1%	41
III.3.4	Pembuatan Larutan PVA 1,5%	42
III.3.5	Pembuatan Larutan Natrium Alginat 1%	42
III.3.6	Pembuatan Larutan <i>Sodium tripolyphosphate</i> 0,1%	42
III.3.7	Pembuatan Larutan Kitosan-PVA.....	42
III.3.8	Pembuatan Larutan Taut silang Kitosan - STPP.....	42
III.3.9	Pembuatan Larutan Natrium Alginat -Gliserol.....	43
III.3.10	Pembuatan film Film Tipis	43
III.3.11	Karakterisasi film Bioplastik	44
III.3.12	Pengaplikasian Film pada Buah Tomat	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		49
IV.1	Identitas Gugus Fungsi	49
IV.2	Struktur Kristal Film (XRD) menggunakan XRD	60
IV.3	Berat dan ketebalan	63
IV.4	Kuat Tarik Film.....	64
IV.5	Hidrofilisitas Film	67
IV.6	Uji Serapan Uap Air	69
IV.7	Pengembangan (<i>Swelling</i>) Film	71
IV.8	<i>Water Vapour Transmission Rate</i> (WVTR) Film.....	73
IV.9	Porositas Film	75
IV.10	Kadar Air Fim	77
IV.11	Biodegradabilitas Film.....	79

IV.12 Aplikasi Film Bioplastik terhadap Daya Simpan Tomat.....	81
BAB V PENUTUP	84
V.1 Kesimpulan	84
V.2 Saran.....	85
DAFTAR PUSTAKA	86
LAMPIRAN	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1	Struktur Kitosan	10
Gambar II. 2	Struktur PVA.....	12
Gambar II. 3	Struktur Natrium Alginat	13
Gambar II. 4	Struktur Gliserol	16
Gambar II. 5	Struktur Sodium Tripolifosfat	18
Gambar II. 6	Reaksi Kalsium Asetat dari Cangkang Telur	19
Gambar II.7	Struktur Ikatan Silang Egg-box Alginat dan Ion Kalsium.....	22
Gambar IV.1	Spektra FTIR Bahan	50
Gambar IV.2	Spektra FTIR Kitosan/PVA/STPP	51
Gambar IV.3	Spektra FTIR Alginat/Gliserol/Ca.....	53
Gambar IV.4	Spektra FTIR Ca (0 mg - 10 mg)	56
Gambar IV.5	Perkiraan Ikatan Kitosan/PVA-STPP/Na - Alg-Ca	58
Gambar IV.6	Pola XRD Bioplastik Tanpa Ca dan Menggunakan Ca.....	60
Gambar IV. 7	Grafik Hubungan Elongasi dan Kuat Tarik	65
Gambar IV.8	Presentase Serapan Air Film	69
Gambar IV.9	Presentase Pengembangan (<i>Swelling</i>) Film	71
Gambar IV.10	Data <i>Water Vapour Transmission Rate</i> (WVTR) Film	73
Gambar IV.11	Presentase Porositas Film	75
Gambar IV.12	Presentase Kadar Air Film	78
Gambar IV. 13	Evaluasi Visual Kesegaran Buah Tomat	83

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1	Sifat Mekanik Plastik	8
Tabel IV.1	Interpretasi Spektra FTIR dengan penambahan variasi Ca	54
Tabel IV.2	Perhitungan Jarak Antar Lapisan dan Ukuran Kristal.....	62
Tabel IV.3	Data Berat Dan Ketebalan Film	63
Tabel IV.4	Nilai Kuat Tarik dan Elongasi Film	65
Tabel IV.5	Nilai sudut kontak berbagai jenis film.....	67
Tabel IV.6	Waktu Biodegradabilitas Film	80

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Penelitian.....	99
Lampiran 2. Hasil Uji FTIR	100
Lampiran 3. Hasil Uji Berat dan Ketebalan Film	111
Lampiran 4. Uji Hidrofilisitas Membran	112
Lampiran 5. Hasil Uji Serapan Uap Air.....	113
Lampiran 6. Hasil Uji Pengembangan (<i>Swelling</i>)	114
Lampiran 7. Hasil Uji <i>Water Vapour Transmission Rate</i> (WVTR)	115
Lampiran 8. Hasil Uji Porositas	116

DAFTAR LAMBANG

CS	Kitosan
PVA	Poli(vinil alkohol)
NA	Natrium Alginat
STPP	<i>Sodium Tripolyphosphate</i>
CaO	Kalsium Oksida
CaCO ₃	Kalsium Karbonat
Ca	Kalsium asetat
Ca 0 mg	Kalsium asetat tidak ada variasi berat
Ca 2,5 mg	Kalsium asetat dengan variasi berat 2,5 mg
Ca 5 mg	Kalsium asetat dengan variasi berat 5 mg
Ca 7,5 mg	Kalsium asetat dengan variasi berat 7,5 mg
Ca 10 mg	Kalsium asetat dengan variasi berat 10 mg

ABSTRAK

Peningkatan volume limbah plastik konvensional yang sulit terurai merupakan permasalahan lingkungan yang mendesak untuk segera ditangani. Salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam mengatasi permasalahan tersebut adalah pengembangan material alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti film bioplastik berbasis bahan alami yang dapat terdegradasi secara hayati. Penelitian ini bertujuan untuk memformulasi dan mengkarakterisasi film bioplastik multikomponen yang disusun dari kitosan, poli(vinil alkohol) (PVA), dan natrium alginat. Modifikasi dilakukan melalui penambahan sodium tripolifosfat (STPP) sebagai agen penaut silang (*crosslinker*) untuk kitosan, serta kalsium asetat hasil reaksi kalsium oksida (CaO) dari cangkang telur dengan asam asetat sebagai *crosslinker* untuk alginat. Gliserol digunakan sebagai agen pelunak (*plasticizer*). Metode sintesis dilakukan secara berlapis (*layer-by-layer*) untuk menghasilkan struktur film yang lebih stabil dan menyatu. Karakterisasi film meliputi pengujian ketebalan, berat, kuat tarik, persen pemanjangan (*elongasi*), penyerapan air, sudut kontak, kadar air, dan porositas. Selain itu, analisis struktur dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi kalsium asetat sebesar 0, 2,5, 5,0, 7,5, dan 10 mg terhadap sifat fisis dan mekanis film yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan kalsium asetat mampu meningkatkan kekuatan mekanik, menurunkan penyerapan air dan kadar air, meningkatkan sudut kontak, serta mengurangi porositas film. Spektrum FTIR mengindikasikan terbentuknya ikatan elektrostatik dan interaksi ionik antara gugus amina pada kitosan, gugus karboksilat pada alginat, serta ion polianion dari STPP dan Ca^{2+} . Sementara itu, analisis XRD menunjukkan adanya peningkatan kristalinitas dan terbentuknya zona semi-kristalin sebagai akibat dari proses penautan silang ionik. Uji aplikasi dilakukan terhadap tomat segar yang disimpan selama 49 hari pada suhu ruang. Hasil observasi menunjukkan bahwa film bioplastik mampu mempertahankan penampakan visual tomat secara signifikan dibandingkan dengan kontrol tanpa pelapisan, yang mengindikasikan efektivitas film sebagai bahan pengemas. Dengan demikian, film bioplastik multikomponen ini memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai bahan kemasan pangan yang *biodegradable* dan ramah lingkungan.

Kata Kunci : alginat, bioplastik, *crosslinker*, kitosan, PVA

ABSTRACT

The increasing volume of conventional plastic waste, which is difficult to degrade, poses an urgent environmental challenge that must be addressed. One promising approach to mitigate this issue is the development of alternative, more environmentally friendly materials, such as bioplastic films derived from natural and *biodegradable* components. This study aims to formulate and characterize a multicomponent bioplastic film composed of chitosan, poly(vinyl alcohol) (PVA), and sodium alginate. The film was modified by adding sodium tripolyphosphate (STPP) as a crosslinking agent for chitosan, and calcium acetate produced from the reaction between calcium oxide (CaO) derived from eggshells and acetic acid as a crosslinker for alginate. Glycerol was added as a *plasticizer*. The synthesis was carried out using a layer-by-layer method to obtain a more stable and integrated film structure. Film characterization included tests for thickness, weight, tensile strength, elongation at break, water absorption, contact angle, moisture content, and porosity. Structural analyses were performed using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy and X-Ray Diffraction (XRD). The study investigated the effect of varying calcium acetate concentrations (0, 2.5, 5.0, 7.5, and 10 mg) on the physical and mechanical properties of the films. The results showed that the addition of calcium acetate improved mechanical strength, reduced water absorption and moisture content, increased contact angle, and decreased film porosity. FTIR spectra indicated the formation of electrostatic and ionic interactions between the amine groups of chitosan, the carboxylate groups of alginate, and the polyanionic ions from STPP and Ca^{2+} . Meanwhile, XRD analysis revealed enhanced crystallinity and the formation of semi-crystalline regions due to ionic crosslinking. An application test was conducted using fresh tomatoes stored at room temperature for 49 days. Observations indicated that the bioplastic film effectively preserved the tomatoes' visual appearance compared to the control, demonstrating its packaging performance. Therefore, this multicomponent bioplastic film shows strong potential for further development as an effective and eco-friendly *biodegradable* food packaging material.

Keywords : alginate, bioplastic, crosslinker, chitosan, PVA

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Plastik merupakan material sintetis berbasis polimer yang telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan modern. Keunggulannya yang mencakup bobot ringan, kekuatan mekanik tinggi, fleksibilitas, dan ketahanan terhadap degradasi menjadikannya sangat diminati dalam berbagai aplikasi, mulai dari kemasan makanan hingga peralatan rumah tangga (Sharma dkk., 2021). Meskipun demikian, sebagian besar plastik konvensional seperti PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, dan PS diproduksi dari sumber daya tak terbarukan seperti minyak bumi dan tidak dapat terurai secara hayati (Rosenboom dkk., 2022). Hal ini menyebabkan akumulasi limbah plastik yang signifikan di lingkungan.

Peningkatan konsumsi plastik global turut memicu lonjakan timbunan sampah. *Organisation for Economic Co-operation and Development* OECD (2022) melaporkan bahwa produksi plastik dunia mencapai 460 juta ton pada 2019 dan diproyeksikan melonjak lebih dari dua kali lipat pada 2060 jika tidak diimbangi oleh kebijakan intervensi. Di tingkat nasional, data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2024) menunjukkan bahwa dari 33,79 juta ton sampah domestik, sekitar 19,64% merupakan sampah plastik. Sebagian besar limbah ini berakhir mencemari lingkungan akuatik melalui sistem sungai, sehingga memperkuat urgensi pengembangan material alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Ancaman dari plastik tidak hanya bersifat ekologis, tetapi juga menyentuh aspek kesehatan manusia. Mikroplastik berukuran mikroskopis yang dihasilkan dari degradasi plastik telah terdeteksi dalam darah manusia, dengan jalur masuk melalui konsumsi makanan, air, maupun inhalasi udara (Weligama Thuppahige & Karim, 2022). Estimasi dari Senathirajah et al. (2021) menunjukkan bahwa asupan mikroplastik dapat mencapai 5 gram per minggu. Meskipun dampak fisiologis jangka panjangnya masih diteliti, temuan-temuan ini mendorong pencarian solusi material pengganti yang aman dan berkelanjutan.

Sebagai respons terhadap persoalan tersebut, bioplastik dikembangkan dari bahan terbarukan dengan kemampuan untuk terurai secara alami. Namun, performa bioplastik masih belum sebanding dengan plastik konvensional, khususnya dalam hal kekuatan mekanik, sensitivitas terhadap kelembapan, dan kestabilan selama penyimpanan. Kondisi ini menjadi tantangan tersendiri bagi pengemasan komoditas hortikultura segar yang sangat rentan terhadap kerusakan pascapanen. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi sifat fisik, mekanik, hidrofobik, dan kimia dari sistem film bioplastik secara kuantitatif.

Strategi formulasi yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi pendekatan multilapis yang memungkinkan pemanfaatan keunggulan spesifik dari masing-masing polimer. Lapisan pertama terdiri atas sistem kitosan-PVA yang ditaut silang oleh STPP, sedangkan lapisan kedua tersusun atas sistem alginat-gliserol dengan penambahan kalsium asetat. Konfigurasi berlapis ini dirancang untuk membagi fungsi secara selektif, di mana lapisan dalam memiliki fleksibilitas tinggi dan lapisan luar difokuskan pada ketahanan terhadap air. Formulasi ini

sekaligus memungkinkan penerapan agen pengikat silang secara terpisah sesuai karakteristik kimia masing-masing matriks (Giz dkk., 2020).

Pemilihan bahan penyusun didasarkan pada aspek fungsional dan keberlanjutan. PVA dipadukan dengan kitosan untuk memperbaiki fleksibilitas dan kekuatan tarik film, meskipun PVA bukan polimer alami. Namun, sifat biodegradabilitasnya dalam kondisi lingkungan tertentu menjadikan material ini tetap layak dalam sistem kemasan pangan yang ramah lingkungan (Oun dkk., 2022). Sementara itu, gliserol digunakan sebagai pemlastis karena kemampuannya membentuk ikatan hidrogen dengan gugus hidroksil dalam rantai polimer, meningkatkan homogenitas dan kelenturan struktur film. Efektivitas gliserol juga terbukti lebih unggul dibandingkan sorbitol atau PEG (Ortega-Toro dkk., 2014).

Kalsium asetat dalam penelitian ini disintesis dari limbah cangkang telur melalui proses kalsinasi yang dilanjutkan dengan reaksi menggunakan asam asetat. Pemanfaatan limbah ini merepresentasikan prinsip ekonomi sirkular dan pendekatan kimia hijau (Strelec dkk., 2023). Dibandingkan dengan CaCl_2 , kalsium asetat memiliki sifat tidak higroskopis ($\text{POD} \geq 95\%$) sehingga lebih stabil untuk aplikasi kemasan (Schlegel dkk., 2002). Di sisi lain, STPP dipilih sebagai agen silang karena aman untuk pangan, tidak toksik, dan lebih ekonomis dibandingkan glutaraldehida (Danait-Nabar dkk., 2025).

Peran masing-masing agen pengikat silang memperkuat integritas film. STPP membentuk ikatan ionik dengan gugus amina pada kitosan, menghasilkan struktur yang lebih padat dan tahan terhadap oksidasi. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan STPP dapat meningkatkan ketebalan film, kekuatan tarik, kestabilan

termal, serta aktivitas antioksidan (Bhatia dkk., 2024). Sementara itu, ion Ca^{2+} dari kalsium asetat berikatan dengan gugus karboksilat pada alginat melalui mekanisme *egg-box* dan turut berinteraksi dengan gugus $-\text{NH}_2$ pada kitosan, membentuk jaringan yang stabil secara kimia dan mekanik (Rinaudo dkk., 2006).

Efektivitas pendekatan multilapis ini juga diperkuat oleh temuan sebelumnya. Nunes de Lima Moreira et al. (2023) menunjukkan bahwa ion Ca^{2+} dari cangkang telur memperkuat struktur film pektin-pati melalui pembentukan jaringan ionik homogen. Madhu et al. (2025) melaporkan bahwa kalsium dari cangkang telur meningkatkan kestabilan mekanik dan resistensi degradasi pada film berbasis pati. Bukti ini mendukung relevansi pendekatan multilapis dalam sistem kemasan berbasis polimer alami.

Aplikasi utama dari sistem ini ditujukan untuk pengemasan tomat, komoditas hortikultura yang sangat rentan terhadap kerusakan akibat kandungan air tinggi dan laju respirasi cepat. *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2019) mencatat bahwa sekitar 14% produksi pangan global hilang pada tahap pascapanen, dengan hortikultura sebagai penyumbang terbesar. FAO juga menegaskan pentingnya pengemasan yang fungsional dan berkelanjutan, terutama di negara berkembang yang menghadapi tantangan infrastruktur logistik.

Dengan mempertimbangkan seluruh aspek teknis, fungsional, dan aplikatif tersebut, formulasi bioplastik multilapis dalam penelitian ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan film konvensional sekaligus mendorong inovasi material berbasis bio. Pendekatan ini konsisten dengan arah pengembangan teknologi berkelanjutan dan ekonomi sirkular. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan

mengkarakterisasi film multilapis berbasis kitosan-PVA-STPP dan alginat-gliserol-kalsium asetat, serta mengevaluasi sifat fisik, mekanik, dan hidrofobik guna menilai potensi aplikasinya sebagai bahan pengemas buah segar yang aman dan ramah lingkungan.

I.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mensintesis film bioplastik multilapis berbasis kitosan-PVA-STPP dan alginat-gliserol-kalsium asetat dari cangkang telur sebagai agen pengikat silang.
2. Menganalisis karakteristik fisikokimia dan biodegradabilitas film bioplastik yang dihasilkan.
3. Mengevaluasi efektivitas film sebagai kemasan aktif untuk buah tomat, khususnya dalam daya simpan dan penghalang kelembapan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Plastik

Plastik merupakan material sintetis yang tersusun atas rantai panjang molekul polimer hasil proses polimerisasi monomer seperti etilena, propilena, atau stirena. Struktur kimia yang stabil dan kuat menjadikan plastik sangat resisten terhadap proses degradasi di lingkungan. Berdasarkan jenis monomer penyusunnya, plastik diklasifikasikan ke dalam beberapa tipe utama, antara lain *polyethylene terephthalate* (PET), *polypropylene* (PP), *polyethylene* (PE), dan *polystyrene* (PS), yang masing-masing memiliki karakteristik fisika dan kimia khas (Li dkk., 2016).

Material ini digunakan secara luas dalam berbagai sektor industri karena gabungan sifat fisik dan kimia yang unggul. Dari segi fisik, plastik memiliki densitas rendah, ringan, tidak larut dalam air, serta dapat diformulasikan menjadi fleksibel maupun kaku sesuai kebutuhan aplikasi. Secara kimia, plastik bersifat inert dan tidak mudah bereaksi dengan zat lain, sehingga sulit terurai secara hayati. PET dikenal memiliki kekuatan tarik tinggi dan ketahanan terhadap pelarut polar; PE dan PP memiliki struktur nonpolar yang memberikan ketahanan terhadap air dan bahan kimia; sedangkan PS memiliki kekakuan tinggi dan stabilitas dimensi yang baik, meskipun cenderung rapuh (Gewert dkk., 2015). Kombinasi sifat-sifat tersebut menjadikan plastik ideal untuk aplikasi di bidang kemasan pangan, elektronik, otomotif, konstruksi, dan tekstil. Akan tetapi, keberadaan ikatan kovalen yang kuat, terutama antara atom karbon dan hidrogen, menyebabkan laju degradasi plastik di lingkungan menjadi sangat rendah (Wang dkk., 2019; Li dkk., 2016).

Meskipun memberikan manfaat besar dalam berbagai bidang, akumulasi limbah plastik telah berkembang menjadi krisis lingkungan global. Plastik yang tidak terurai secara alami akan terfragmentasi menjadi mikroplastik, yaitu partikel berukuran kurang dari 5 mm. Mikroplastik telah terdeteksi di berbagai media lingkungan, termasuk udara, air minum, makanan laut, dan bahkan dalam darah manusia (Zhang dkk., 2020). Sifat hidrofobik dan luas permukaan spesifik yang tinggi memungkinkan partikel ini mengadsorpsi berbagai polutan organik berbahaya, seperti pestisida, logam berat, dan senyawa organik persisten (*persistent organic pollutants/POPs*), yang berpotensi terakumulasi dalam rantai makanan (Silva dkk., 2018).

Dampak mikroplastik terhadap organisme telah dibuktikan melalui berbagai studi toksikologi. Hwang dkk. (2019) menunjukkan bahwa nanopartikel plastik polipropilena dapat memicu stres oksidatif dan apoptosis pada sel paru-paru manusia. Barboza dkk. (2018) melaporkan adanya gangguan neurologis pada ikan yang terpapar mikroplastik di lingkungan perairan. Phuong dkk. (2016) juga mengonfirmasi keberadaan kontaminasi mikroplastik dalam berbagai organisme laut yang dikonsumsi manusia. Di wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi, terutama di negara berkembang, mikroplastik terdeteksi dalam sedimen dan air sungai, menandakan ancaman yang luas terhadap ekosistem akuatik dan kesehatan masyarakat.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, pengembangan material alternatif yang ramah lingkungan menjadi semakin mendesak. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penggunaan bioplastik, yakni material berbasis polimer alami

yang dapat terdegradasi secara hayati. Bioplastik dirancang untuk menggantikan sebagian fungsi plastik konvensional dalam berbagai aplikasi industri tanpa meninggalkan residu berbahaya di lingkungan. Dengan karakteristik yang lebih selaras dengan prinsip keberlanjutan, bioplastik menawarkan jalur transisi menuju sistem produksi dan konsumsi yang lebih bertanggung jawab secara ekologis.

Tabel II. 1 Sifat Mekanik Plastik

Karakteristik	Nilai
Ketebalan (mm)	$\leq 0,25$ mm (<i>Japanese Industrial Standar</i>)
Kuat Tarik (MPa)	24,7-302 (SNI)
Elongasi (%)	21-220 (SNI)
<i>Swelling</i> (%)	99
Serapan Air (%)	<25 setelah perendaman 24 jam (SNI)
Kadar Air (%)	<10
Berat Jenis / Densitas (gr)	1,34 - 1,40 (SNI)

II.2 Bioplastik

Bioplastik merupakan material polimer yang berasal dari sumber daya alam terbarukan serta memiliki kemampuan untuk terdegradasi secara hayati melalui aktivitas mikroorganisme. Proses degradasi ini menghasilkan senyawa sederhana berupa air, karbon dioksida, dan biomassa. Kemampuannya untuk terurai tanpa meninggalkan residu berbahaya menjadikan bioplastik sebagai bahan yang ramah lingkungan karena dapat kembali ke siklus alam tanpa menimbulkan pencemaran jangka panjang (Haider dkk., 2019).

Menurut Cucina (2023), bioplastik dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama berdasarkan asal bahan bakunya. Kelompok pertama mencakup bioplastik berbasis bio-resin seperti polilaktat (PLA), polihidroksibutirat (PHB), dan pati, yang berasal dari sumber hayati seperti jagung, tebu, atau singkong.

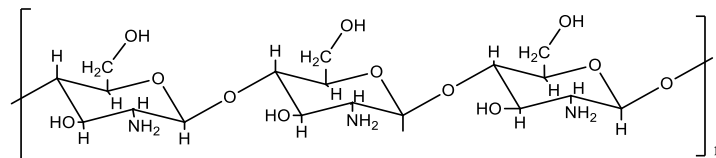
Kelompok kedua terdiri atas bioplastik berbasis polimer sintetik yang bersifat biodegradabel, seperti poli(vinil alkohol) (PVA) dan polibutilen adipat tereftalat (PBAT). Kedua jenis bioplastik ini memiliki potensi besar untuk menggantikan plastik konvensional berbasis minyak bumi, sekaligus mendorong transisi menuju sistem material yang lebih berkelanjutan.

Dari segi struktur kimia, bioplastik umumnya mengandung gugus fungsional seperti hidroksil (-OH) dan ester, yang memungkinkan terjadinya degradasi melalui mekanisme hidrolisis maupun aktivitas enzimatik. Struktur ini berbeda secara fundamental dari ikatan karbon-karbon yang mendominasi plastik konvensional, yang bersifat lebih stabil dan sangat resisten terhadap degradasi (Tang dkk., 2008). Meskipun kemudahan degradasi ini menjadi keunggulan utama dalam konteks lingkungan, bioplastik juga memiliki sejumlah keterbatasan, seperti ketahanan mekanik yang lebih rendah dan kerentanan terhadap penyerapan air, yang dapat membatasi aplikasinya dalam kondisi tertentu.

Selain sifatnya yang dapat terurai, keunggulan bioplastik juga terletak pada sumber bahan bakunya yang berasal dari sumber daya terbarukan, seperti tanaman dan hasil pertanian. Bioplastik umumnya tidak bersifat toksik dan aman digunakan untuk aplikasi yang melibatkan kontak langsung dengan pangan. Weng dkk. (2013) menyatakan bahwa bioplastik merupakan solusi berkelanjutan dalam industri kemasan, terutama untuk produk makanan segar. Karakteristiknya yang ramah lingkungan dan aman mendukung penerapan ekonomi sirkular dan selaras dengan upaya global untuk mengurangi pencemaran akibat plastik berbasis fosil.

II.3 Kitosan

Kitosan merupakan polisakarida alami yang diperoleh melalui proses deasetilasi terhadap kitin, yaitu biopolimer yang banyak ditemukan pada eksoskeleton hewan laut seperti udang dan kepiting, serta pada dinding sel jamur. Kitin tersusun atas unit N-asetil-D-glukosamin yang saling terhubung melalui ikatan β -(1 $\rightarrow$ 4). Proses deasetilasi mengubah gugus asetil pada rantai kitin menjadi gugus amina bebas ($-\text{NH}_2$) dengan menggunakan larutan basa kuat, seperti natrium hidroksida dalam kondisi panas. Transformasi ini menghasilkan kitosan dengan derajat deasetilasi tertentu yang menentukan kelarutan, reaktivitas kimia, dan aktivitas biologisnya (Zehra dkk., 2022). Keberadaan gugus amina tersebut menyebabkan kitosan bermuatan positif pada pH di bawah 6,5, sehingga mampu berinteraksi secara elektrostatik dengan ion logam, protein bermuatan negatif, dan membran mikroorganisme (Wang dkk., 2005).



Gambar II. 1 Struktur Kitosan

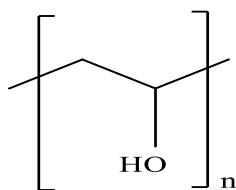
Secara fisik, kitosan berbentuk padatan amorf berwarna putih kekuningan, tidak berbau, serta memiliki kemampuan membentuk film yang transparan. Film kitosan memiliki permeabilitas gas yang sedang dan dapat dimodifikasi melalui penambahan zat aditif atau pembentukan ikatan silang untuk menyesuaikan sifatnya. Komposisi kimia kitosan terdiri atas dua unit monomer utama, yaitu glukosamin (sekitar 70-80%) dan N-asetilglukosamin (sekitar 20-30%), dengan berat molekul berkisar antara 10^5 hingga 10^6 Dalton, tergantung pada metode

ekstraksi dan tingkat deasetilasi (Elsabee & Abdou, 2013). Derajat deasetilasi yang lebih tinggi meningkatkan jumlah gugus amina bebas, memperkuat ikatan hidrogen dan elektrostatik antar rantai, serta memperbaiki stabilitas struktural film. Dari segi kelarutan, kitosan bersifat tidak larut dalam air murni, pelarut organik netral, maupun larutan basa, tetapi dapat larut dalam asam organik lemah seperti asam asetat, asam laktat, dan asam sitrat. Pelarutan ini terjadi akibat protonasi gugus amina ($-NH_2$) menjadi $-NH_3^+$ dalam medium asam, yang meningkatkan interaksi dengan pelarut (Rinaudo, 2006). Selain itu, gugus hidroksil ($-OH$) dan amina yang terdapat dalam strukturnya menjadikan kitosan sangat reaktif terhadap berbagai modifikasi kimia, seperti reaksi grafting, kopolimerisasi, serta pembentukan ikatan silang (Ahmed & Ikram, 2016). Kitosan juga dikenal memiliki aktivitas antimikroba yang luas terhadap mikroorganisme Gram-positif maupun Gram-negatif. Mekanisme antimikroba ini berkaitan dengan interaksi elektrostatik antara gugus amina bermuatan positif dan dinding sel mikroba bermuatan negatif, yang mengganggu integritas membran sel, menyebabkan kebocoran isi sel, dan akhirnya menimbulkan lisis (Abd El-Hack dkk., 2020). Selain bersifat bioaktif, kitosan juga mudah terurai di lingkungan melalui aksi enzimatik oleh enzim seperti kitosanase dan lisozim. Penelitian menunjukkan bahwa film kitosan dapat terdegradasi lebih dari 40% dalam waktu kurang dari satu bulan ketika dikubur di tanah (Ngo & Kim, 2014).

II.4 Poli(vinil alkohol) (PVA)

Poli(vinil alkohol) (PVA) merupakan polimer sintetis yang larut dalam air dan banyak dimanfaatkan karena sifat fisik serta kimia yang mendukung berbagai aplikasi, terutama pada bidang kemasan, tekstil, dan farmasi. Material ini diperoleh

melalui proses hidrolisis parsial atau total terhadap polivinil asetat, menghasilkan rantai linier dengan kandungan gugus hidroksil (-OH) yang tinggi. Keberadaan gugus hidroksil memungkinkan pembentukan ikatan hidrogen secara intramolekul maupun antarmolekul, sehingga menghasilkan film yang kuat, stabil, dan memiliki daya rekat tinggi terhadap berbagai jenis permukaan (Fu dkk., 2022).



Gambar II. 2 Struktur PVA

PVA memiliki bentuk padatan transparan yang lentur pada suhu ruang. Struktur semi-kristalin berperan penting dalam meningkatkan kestabilan mekanik dan termal. Berat molekul PVA umumnya berada dalam kisaran 85.000 hingga 150.000 g/mol, sedangkan suhu transisi gelas (*glass transition temperature*, T_g) tercatat antara 228 °C hingga 256 °C tergantung pada derajat polimerisasi dan tingkat hidrolisis. Kandungan gugus hidroksil menyebabkan PVA bersifat hidrofilik dan mudah menyerap air. Ketika terpapar kelembapan, material ini mengalami pengembangan (*Swelling*) yang signifikan (Bercea, 2024).

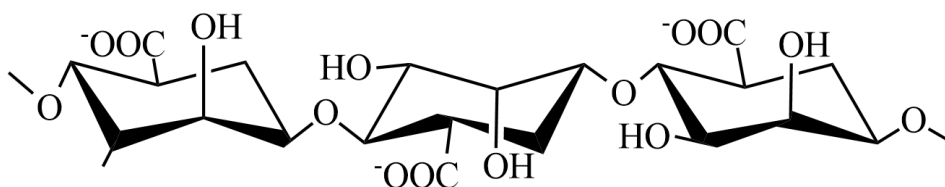
Kelarutan PVA dalam air sangat bergantung pada derajat hidrolisis. Derajat hidrolisis yang tinggi menghasilkan lebih banyak gugus hidroksil bebas yang membentuk ikatan antarmolekul kuat, sehingga menurunkan kelarutan. Derajat hidrolisis yang rendah membuat PVA lebih mudah larut, tetapi cenderung menghasilkan film yang kurang stabil (Carvalho dkk., 2019; Solaro dkk., 2000). Walaupun tergolong sebagai polimer sintetis, PVA memiliki potensi terdegradasi secara hayati dalam lingkungan yang mengandung mikroorganisme atau enzim

tertentu. Laju degradasi dipengaruhi oleh tingkat kristalinitas, berat molekul, kelembapan, dan suhu (Chiellini dkk., 1999).

Penggunaan PVA dalam pengembangan bioplastik difokuskan pada perannya sebagai komponen matriks atau agen pendispersi yang kompatibel dengan biopolimer alami seperti kitosan, alginat, dan pati. Kompatibilitas ini didasarkan pada kemampuan PVA membentuk ikatan hidrogen dengan gugus -OH atau -NH₂ dari biopolimer lain, sehingga menghasilkan matriks film yang homogen tanpa pemisahan fase. Penambahan PVA ke dalam film kitosan terbukti dapat meningkatkan kekuatan tarik dan fleksibilitas tanpa mengganggu aktivitas antimikroba yang dimiliki kitosan (Dash dkk., 2011).

II.5 Natrium Alginat

Natrium alginat merupakan polisakarida anionik alami yang diperoleh melalui proses ekstraksi dari dinding sel rumput laut cokelat, seperti *Laminaria*, *Macrocystis*, dan *Ascophyllum*. Proses ekstraksi menggunakan larutan basa yang mengubah asam alginat menjadi bentuk garam natrium, sehingga menghasilkan senyawa yang lebih stabil dan larut dalam air. Bahan ini berasal dari sumber daya terbarukan, tidak toksik, dan dapat terurai secara hayati. Karakteristik tersebut menjadikan natrium alginat sangat potensial untuk digunakan dalam bidang pangan, farmasi, dan kemasan ramah lingkungan (Wong & Azmi, 2020).



Gambar II. 3 Struktur Natrium Alginat

Struktur natrium alginat terdiri atas dua unit monomer utama, yaitu β -D-mannuronat (M) dan α -L-guluronat (G), yang terhubung melalui ikatan glikosidik membentuk rantai linier. Perbandingan antara kedua unit tersebut sangat menentukan sifat fisik gel atau film yang dihasilkan. Rasio G yang tinggi memberikan struktur gel dan film yang lebih kaku dan padat, sedangkan dominasi unit M menghasilkan material yang lebih lunak dan elastis (Abasalizadeh dkk., 2020). Sifat hidrofilik yang kuat menyebabkan natrium alginat mudah larut dalam air dan menyerap kelembapan dari lingkungan. Keberadaan gugus hidroksil (-OH) dan karboksilat ($-\text{COO}^-$) pada rantai molekul memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen dengan molekul air, yang menyebabkan pembengkakan berlebih. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan kekuatan mekanik film, terutama dalam aplikasi kemasan aktif. Singh et al. (2023) menunjukkan bahwa sifat hidrofilik ini meningkatkan daya serap air dan menurunkan stabilitas struktural film, sejalan dengan temuan Korumilli et al. (2024) yang menekankan pentingnya pembentukan ikatan silang atau penambahan komponen hidrofobik untuk mengurangi efek negatif akibat interaksi dengan air.

Upaya modifikasi struktural dilakukan untuk meningkatkan performa mekanik dan stabilitas hidrogel atau film berbasis alginat. Salah satu pendekatan utama adalah penambahan ion logam multivalen seperti Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , dan Fe^{3+} yang membentuk struktur tiga dimensi melalui mekanisme *egg-box* dengan blok guluronat pada rantai alginat. Karakteristik gel yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh jenis kation yang digunakan (Malektaj dkk., 2023). Selain ikatan silang ionik, pembentukan kompleks polielektrolit antara gugus karboksilat dari alginat dan

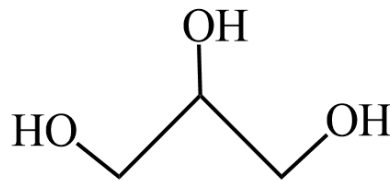
gugus amonium terprotonasi dari kitosan juga digunakan sebagai alternatif yang tidak memerlukan agen silang berbasis logam (Komoto dkk., 2022). Pada bidang biomedis, genipin sebagai agen silang alami telah dimanfaatkan untuk meningkatkan kekuatan mekanik jangka panjang dan kestabilan hidrogel alginat-kitosan, sehingga sesuai untuk aplikasi dalam sistem penyembuhan luka dan hemostasis (Lin dkk., 2025).

Natrium alginat juga memiliki prospek luas dalam pengembangan kemasan ramah lingkungan. Walaupun tidak memiliki aktivitas antimikroba intrinsik seperti kitosan, bahan ini bersifat biokompatibel dan dapat terdegradasi oleh mikroorganisme dalam kondisi lingkungan yang sesuai. Sifat tersebut mendukung penggunaannya dalam formulasi bahan pembungkus makanan, kapsul farmasi, serta sistem penghantaran obat (Aydi dkk., 2023). Dalam pengembangan film bioplastik multikomponen, natrium alginat sering dikombinasikan dengan kitosan dan poli(vinil alkohol) (PVA) untuk meningkatkan kestabilan struktur, kekuatan mekanik, serta pengaturan kelembapan selama penyimpanan. Zhang et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi ketiga polimer tersebut menghasilkan film bilapis dengan ketahanan mekanik dan penghalang uap air yang lebih baik, serta struktur matriks yang lebih padat dan homogen.

II.6 Gliserol

Gliserol merupakan senyawa alkohol berjenis triol yang banyak digunakan sebagai *plasticizer* alami dalam formulasi bioplastik berbasis polisakarida. Struktur kimia gliserol mengandung tiga gugus hidroksil (-OH) yang memberikan sifat polar tinggi, kelarutan dalam air, serta kemampuan membentuk ikatan hidrogen dengan rantai polimer (Jamal dkk., 2021). Interaksi tersebut memperlemah gaya tarik

antarmolekul dan meningkatkan jarak antar rantai, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan mobilitas struktur polimer. Hasilnya adalah film yang lebih lentur, elastis, serta tahan terhadap retakan dan deformasi selama penyimpanan maupun penggunaan (Eslami dkk., 2023).



Gambar II. 4 Struktur Gliserol

Peran gliserol sebagai *plasticizer* utama dalam sistem bioplastik didukung oleh kemampuannya dalam meningkatkan fleksibilitas dan menjaga kelembapan matriks polimer. Penambahan gliserol dalam konsentrasi tertentu terbukti menurunkan modulus elastisitas dan kekuatan tarik, tetapi secara signifikan meningkatkan nilai elongasi atau daya regang maksimum film (Harussani dkk., 2021). Efek ini menjadikan gliserol efektif untuk aplikasi pengemasan yang membutuhkan kelenturan tinggi. Selain itu, gliserol membantu mempertahankan kelembapan dan mencegah terjadinya retakan selama proses pengeringan (Phumkacha dkk., 2023).

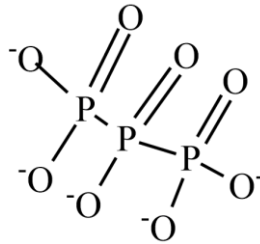
Konsentrasi gliserol yang terlalu tinggi dapat menimbulkan penurunan integritas struktural pada film bioplastik. Peningkatan kadar gliserol menyebabkan penurunan kekuatan mekanik secara keseluruhan, peningkatan kelarutan dalam air, serta pembengkakan (*Swelling*) pada kondisi lingkungan lembap (Jamal dkk., 2021). Pemilihan rasio gliserol yang tepat menjadi hal penting untuk mencapai

keseimbangan antara fleksibilitas dan ketahanan struktural, terutama pada film kemasan aktif dan *biodegradable*.

Sistem film multikomponen menunjukkan kompatibilitas tinggi antara gliserol dan biopolimer seperti kitosan, poli(vinil alkohol) (PVA), dan natrium alginat. Interaksi ini memungkinkan pembentukan matriks film yang homogen tanpa terjadi pemisahan fase selama proses pencampuran (Mohammed dkk., 2023). Keberadaan gliserol juga berperan dalam menjaga kestabilan dispersi dan menghasilkan permukaan film yang halus serta seragam. Dari segi keberlanjutan, gliserol tergolong aditif yang aman, mudah terurai secara hayati, dan mendukung pengembangan bioplastik ramah lingkungan (Jamal dkk., 2021).

II.7 Sodium Tripolifosfat (STPP)

Sodium Tripolifosfat (STPP) merupakan senyawa polifosfat anorganik yang berfungsi sebagai agen pengikat silang (*crosslinker*) dalam sistem bioplastik berbasis kitosan. Struktur kimia STPP mengandung gugus fosfat bermuatan negatif ($-\text{PO}_4^{3-}$) yang mampu berinteraksi secara elektrostatik dengan gugus amina terprotonasi ($-\text{NH}_3^+$) dan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) pada rantai kitosan dalam kondisi asam. Interaksi tersebut membentuk ikatan silang fisik antarmolekul yang menghasilkan jaringan tiga dimensi yang lebih rapat dan stabil. Karena tidak terjadi pembentukan ikatan kovalen, sifat biodegradabilitas film tetap terjaga dan sistem tetap kompatibel dengan medium berbasis air (Bhatia dkk., 2024).



Gambar II. 5 Struktur *Sodium Tripolifosfat*

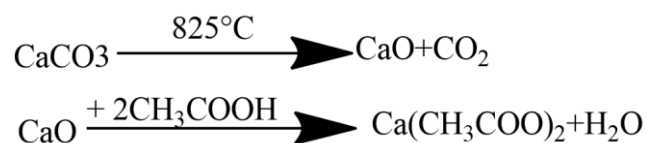
Penambahan STPP ke dalam film kitosan terbukti meningkatkan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan stabilitas termal. Ikatan silang yang terbentuk mampu mengurangi mobilitas rantai polimer serta menurunkan jumlah gugus amina bebas yang bersifat hidrofilik, sehingga menurunkan kelarutan film dalam air. Struktur film yang lebih rapat juga dapat menghambat degradasi termal dan meningkatkan suhu transisi kaca (T_g), sehingga menghasilkan material yang lebih tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem (Bhatia dkk., 2024). Dalam sistem film multikomponen, STPP berperan penting dalam menjaga homogenitas matriks dan memungkinkan integrasi komponen fungsional lain secara efisien.

Aspek keamanan penggunaan STPP telah diatur oleh *European Food Safety Authority* (EFSA), yang menetapkan nilai asupan harian yang dapat ditoleransi (*acceptable daily intake*, ADI) sebesar 40 mg fosfor per kilogram berat badan per hari, atau sekitar 3,2 gram STPP untuk individu dewasa (EFSA, 2019). Regulasi Uni Eropa No. 10/2011 juga menetapkan batas migrasi spesifik (*specific migration limit*, SML) untuk senyawa fosfat dalam bahan kemasan pangan sebesar 60 mg/kg makanan. Ketentuan ini menunjukkan bahwa STPP dapat digunakan secara aman dalam formulasi bioplastik apabila penggunaannya sesuai dengan standar yang berlaku.

Kombinasi antara sifat reaktif, kontribusi terhadap peningkatan performa fisik, dan dukungan regulasi keamanan menjadikan STPP sebagai aditif yang sangat potensial dalam pengembangan bioplastik berbasis kitosan. Penggunaan bahan ini secara tepat dapat meningkatkan kualitas, daya guna, dan keberterimaan produk bioplastik dalam aplikasi pengemasan yang ramah lingkungan.

II.8 Kalsium Asetat dari Cangkang Telur

Kalsium asetat merupakan senyawa garam organik yang dapat disintesis secara ramah lingkungan dari limbah biomineral seperti cangkang telur, yang mengandung lebih dari 90% kalsium karbonat (CaCO_3). Proses sintesis melibatkan tahap kalsinasi, yaitu pemanasan cangkang telur pada suhu tinggi untuk mengubah CaCO_3 menjadi kalsium oksida (CaO), kemudian dilanjutkan dengan reaksi antara CaO dan asam asetat (CH_3COOH) yang menghasilkan kalsium asetat ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) dan karbon dioksida (CO_2) sebagai produk samping. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi limbah padat, tetapi juga menghasilkan sumber ion Ca^{2+} yang larut dalam air dan aman digunakan dalam formulasi bioplastik. Brettfield et al. (2023) menunjukkan bahwa pelarutan cangkang telur dengan asam asetat secara efektif menghasilkan kalsium asetat yang stabil. Efisiensi proses ini juga dapat ditingkatkan melalui pendekatan permukaan respon, sebagaimana dibuktikan oleh Yao et al. (2022), yang menekankan relevansi metode ini dalam mendukung ekonomi sirkular berbasis limbah biomineral.



Gambar II. 6 Reaksi Kalsium Asetat dari Cangkang Telur

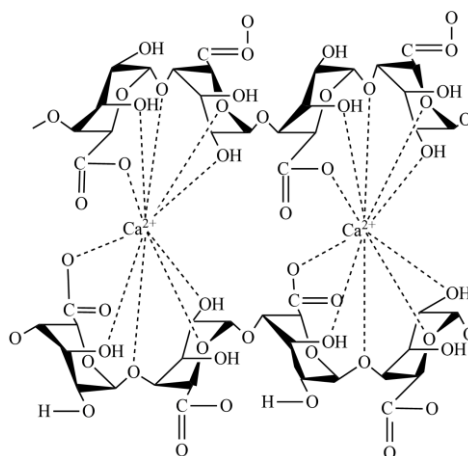
Kalsium asetat melepaskan ion kalsium (Ca^{2+}) yang dapat berinteraksi dengan rantai natrium alginat, khususnya melalui blok asam guluronat (G), membentuk jaringan tiga dimensi yang dikenal sebagai model *egg-box*. Interaksi ionik ini menghasilkan struktur film yang lebih kaku dan kuat, serta meningkatkan ketahanan terhadap deformasi dan penetrasi air (Jørgensen dkk., 2007; Rhim, 2004). Dibandingkan dengan kalsium klorida (CaCl_2), kalsium asetat menunjukkan pelepasan ion Ca^{2+} yang lebih lambat dan terkontrol. Keunggulan ini mencegah pembentukan gel yang terlalu cepat, sehingga memungkinkan terbentuknya struktur film yang lebih homogen dan stabil (Zactiti & Kieckbusch, 2009; Bajpai & Sharma, 2004).

Dalam sistem film bioplastik, kalsium asetat berfungsi sebagai agen pengikat silang (*crosslinker*) alami yang efektif untuk meningkatkan integritas mekanik, ketahanan terhadap air, dan stabilitas dimensi film berbasis alginat. Pemanfaatan cangkang telur sebagai sumber kalsium mendukung prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan melalui konversi limbah pertanian menjadi bahan baku bernilai tambah. Penelitian oleh Sandıkçı dan Isik (2025) menunjukkan bahwa penambahan serbuk cangkang telur ke dalam komposit kalsium alginat meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap pelarutan dalam air, sehingga memperkuat potensinya sebagai bahan pembentuk film. Kajian toksikologis oleh Islam et al. (2019) juga menunjukkan bahwa kalsium hasil kalsinasi dari cangkang telur tidak mengandung logam berat dalam kadar berbahaya seperti timbal (Pb), kromium (Cr), atau arsen (As), serta tidak menimbulkan risiko signifikan terhadap kesehatan. Berdasarkan temuan tersebut, kalsium asetat hasil sintesis dari limbah cangkang

telur dapat dikategorikan sebagai bahan yang ramah lingkungan, aman, dan efektif untuk digunakan sebagai agen pengikat silang dalam formulasi bioplastik berbasis polisakarida.

II.9 Mekanisme Ikatan Silang pada Sistem Alginat-Ion Kalsium

Mekanisme *egg-box* merupakan model interaksi ionik yang menjelaskan pembentukan ikatan silang antara polimer anionik dan ion logam divalen, terutama ion kalsium (Ca^{2+}), yang banyak diterapkan pada sistem berbasis natrium alginat. Struktur alginat tersusun atas dua jenis unit monomer, yaitu asam guluronat (G) dan asam manuronat (M), dengan afinitas pengikatan Ca^{2+} yang lebih tinggi pada blok G karena konfigurasi yang linier. Ketika dua rantai polimer berdekatan dan dijembatani oleh ion Ca^{2+} , terbentuk struktur tiga dimensi khas yang menyerupai wadah telur (*egg-box*) (Cao dkk., 2020; Li dkk., 2007). Validasi terhadap struktur ini dilakukan melalui analisis difraksi sinar-X, yang menunjukkan keterikatan selektif ion Ca^{2+} pada gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) dari blok G (Li dkk., 2007). Proses pembentukan jaringan berlangsung secara fisik dalam medium berair tanpa menghasilkan gugus ester, karena ion Ca^{2+} membentuk ikatan koordinatif dengan gugus karboksilat, sementara anion asetat tetap berada dalam larutan (Makarova dkk., 2023).



Gambar II.7 Struktur Ikatan Silang *Egg-box* Alginat dan Ion Kalsium

Efisiensi pembentukan struktur *egg-box* sangat dipengaruhi oleh kondisi pH lingkungan. Pada pH rendah (< 4), gugus karboksilat terprotonasi menjadi -COOH sehingga kehilangan kemampuan berinteraksi dengan ion Ca^{2+} . Keadaan ini menghambat pembentukan jaringan silang. Pada pH netral hingga sedikit basa (sekitar 6-7), gugus -COO^- tetap terionisasi dan aktif membentuk ikatan koordinatif, menghasilkan jaringan polimer yang padat dan kaku (Cao dkk., 2020). Struktur tersebut meningkatkan sifat mekanik, ketahanan terhadap penetrasi air, serta efektivitas sebagai penghalang difusi (Van Rooyen dkk., 2023). Ikatan dalam struktur *egg-box* bersifat reversibel, tetapi cukup kuat untuk mempertahankan integritas film dalam kondisi penggunaan normal. Pengendalian pH dan pemilihan sumber ion logam menjadi faktor penting dalam mengoptimalkan kinerja material berbasis alginat.

Pemanfaatan sumber ion Ca^{2+} dari bahan alami telah menjadi pendekatan inovatif dalam penerapan mekanisme *egg-box*. Kalsium asetat yang disintesis dari limbah cangkang telur merupakan contoh sumber ion ramah lingkungan yang tidak bersifat higroskopis dan efektif dalam membentuk jaringan ionik stabil (Budakhan

dkk., 2025). Kombinasi antara alginat dan ion Ca^{2+} dari kalsium asetat menghasilkan film dengan kekuatan tarik dan ketahanan kelembapan yang lebih baik, serta struktur mikro yang seragam. Pendekatan serupa telah diterapkan pada biopolimer lain seperti pektin dan mukilase kaktus, yang juga membentuk struktur *egg-box* dan menunjukkan potensi dalam pengembangan kemasan fungsional (Van Rooyen dkk., 2023). Pemahaman mendalam terhadap mekanisme *egg-box*, mulai dari aspek struktur molekuler hingga kondisi lingkungan, menjadi dasar penting dalam merancang bioplastik yang kuat, fungsional, dan berkelanjutan.

II.10 Metode Layer-by-Layer (LBL)

Metode Layer-by-Layer (LbL) merupakan pendekatan fabrikasi film yang dilakukan melalui penyusunan lapisan-lapisan polimer secara bertahap dan bergantian, menggunakan teknik seperti pencelupan berulang atau penyalutan bertingkat. Setiap lapisan diaplikasikan secara terpisah dan difiksasi sebelum penambahan lapisan berikutnya, sehingga terbentuk struktur multilapis yang homogen, stabil, dan terkontrol secara spasial (Kim dkk., 2005). Keunggulan utama metode ini terletak pada kemampuannya dalam mengatur struktur dan interaksi antarlapisan secara presisi, serta memungkinkan integrasi material dengan sifat fisikokimia yang berbeda tanpa menyebabkan inkompatibilitas atau pemisahan fasa selama proses pengeringan (Decher & Schlenoff, 2012).

Karakteristik metode LbL berbeda dari pendekatan satu-larutan homogen seperti pencampuran langsung (*solution blending*), karena memungkinkan diferensiasi fungsi secara spesifik pada setiap lapisan. Kontrol terhadap urutan dan komposisi tiap lapisan memungkinkan penggabungan sifat-sifat tertentu, misalnya permukaan luar yang bersifat hidrofobik dan bagian dalam yang fleksibel atau

responsif terhadap stimulus biologis. Pendekatan ini sangat sesuai untuk aplikasi film fungsional seperti sistem penghantaran obat, kemasan aktif, dan rekayasa jaringan (Park dkk., 2018; Zhang dkk., 2022).

Interaksi elektrostatik, ikatan ionik, dan ikatan hidrogen antar lapisan memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik, kestabilan dimensi, serta efisiensi fungsi dari film multikomponen yang terbentuk. Kontrol struktural yang ditawarkan oleh metode LbL membuka peluang besar dalam perancangan material berbasis polimer yang kompleks dan adaptif untuk berbagai kebutuhan teknologi maju.

II.11 Karakterisasi Membran Bioplastik

II.11.1 Uji Berat dan Ketebalan

Uji berat dan ketebalan merupakan metode dasar dalam karakterisasi material berbentuk film atau lembaran. Ketebalan didefinisikan sebagai jarak antara dua permukaan sejajar pada material dan menjadi indikator penting untuk menilai keseragaman struktur fisik (Tang dkk., 2008). Pengukuran dilakukan menggunakan mikrometer digital atau alat serupa pada beberapa titik acak di permukaan, lalu dirata-ratakan untuk memperoleh nilai representatif. Sementara itu, berat film per satuan luas digunakan untuk mengevaluasi konsistensi distribusi massa dan memberikan gambaran tentang densitas bahan yang tercetak. Kedua parameter ini sangat penting dalam kontrol mutu karena dapat memengaruhi kekuatan mekanik, permeabilitas, dan stabilitas dimensi film.

Nilai ketebalan dan berat juga digunakan untuk memantau ketidakteraturan dalam proses pembentukan film, seperti variasi pelapisan atau pengeringan yang tidak seragam. Ketebalan yang terlalu rendah dapat menyebabkan keretakan atau

ketidalcukupan fungsi pelindung, sementara ketebalan berlebih dapat menurunkan fleksibilitas dan efisiensi bahan. Rumus perhitungan yang umum digunakan yaitu:

Ketebalan rata-rata (mm):

$$\text{Tebal} = \frac{\text{titik1} + \text{titik2} + \text{titik3}}{3} \quad (1)$$

Berat per satuan luas (g/m²):

$$\text{Berat} = \frac{\text{berat1} + \text{berat2} + \text{berat3}}{3} \quad (2)$$

(Tang dkk.,2008).

Penggunaan rumus-rumus ini banyak dijumpai dalam studi karakterisasi film karena hasilnya bersifat kuantitatif dan dapat dibandingkan secara konsisten antar penelitian

II.11.2 Uji kuat tarik dan elongasi

Uji kuat tarik dan elongasi digunakan untuk mengevaluasi sifat mekanik material film atau film tipis. Kuat tarik (*tensile strength*) didefinisikan sebagai gaya maksimum yang mampu ditahan material per satuan luas sebelum putus, sedangkan elongasi saat putus (*elongation at break*) merupakan persentase pertambahan panjang material saat mengalami gaya tarik hingga gagal. Pengujian ini umumnya dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan standar metode seperti ASTM D882. Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung parameter ini adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan} = \frac{F \text{ max}}{A} \quad (3)$$

di mana $F \text{ max}$ adalah gaya maksimum (N) dan A adalah luas penampang awal (mm²).

$$\text{Elongasi saat putus (\%)} = \frac{(L_f - L_0)}{(L_0)} \quad (4)$$

Dimana, L_0 ialah panjang awal dan L_f : panjang akhir saat spesimen putus

Hasil uji ini divisualisasikan dalam bentuk kurva tegangan-regangan (*stress-strain curve*), yang menunjukkan hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Material yang kaku dan rapuh menghasilkan kurva curam dengan tegangan tinggi namun regangan rendah, menunjukkan ketahanan beban besar tetapi minim deformasi plastis. Sebaliknya, material yang ulet dan fleksibel menunjukkan regangan tinggi sebelum patah, yang terlihat pada kurva yang lebih landai dan panjang. Kemiringan awal kurva merepresentasikan modulus elastisitas, sedangkan luas area di bawah kurva mencerminkan ketangguhan (*toughness*) material. Interpretasi kurva ini penting untuk menentukan apakah suatu material cocok digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan daya tahan terhadap gaya tarik atau fleksibilitas tinggi (Tang dkk.,2022; ASTM D882, 2018).

II.11.3 Uji Hidrofilisitas

Hidrofilisitas adalah sifat permukaan material yang menunjukkan sejauh mana permukaan tersebut dapat menarik, menyerap, atau berikatan dengan air. Salah satu metode paling umum untuk mengevaluasi hidrofilisitas adalah pengukuran sudut kontak air (*water contact angle*), yaitu sudut antara permukaan padat dan tepi tetesan air yang ditempatkan di atasnya. Semakin kecil sudut kontak ($< 90^\circ$), semakin tinggi tingkat keterbasahan atau hidrofilisitasnya, sedangkan sudut $> 90^\circ$ menunjukkan sifat hidrofobik. Pengukuran ini dilakukan secara non-destruktif dan memberikan indikator kuantitatif terhadap energi permukaan material (Yuan & Lee, 2013; Tang dkk.,2022).

Uji hidrofilisitas memiliki peran penting dalam mengevaluasi respon material terhadap kelembaban. Permukaan yang sangat hidrofilik cenderung menyerap air lebih cepat, yang dapat memengaruhi stabilitas dimensi, kekuatan mekanik, serta permeabilitas uap air. Sebaliknya, permukaan dengan sudut kontak lebih tinggi menunjukkan resistensi terhadap kelembaban, menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi yang menuntut ketahanan air, seperti kemasan fleksibel. Oleh karena itu, nilai sudut kontak tidak hanya merepresentasikan sifat permukaan, tetapi juga berfungsi sebagai indikator performa material dalam kondisi lingkungan yang mengandung air atau uap air (Kwok & Neumann, 1999).

II.11.4 Uji serap air

Uji serap air (*water uptake test*) merupakan metode karakterisasi yang digunakan untuk menentukan kemampuan suatu material dalam menyerap air ke dalam strukturnya. Secara teoritis, tingkat serapan air mencerminkan adanya interaksi antara molekul air dengan jaringan internal material, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti porositas, kerapatan jaringan, dan keberadaan gugus polar. Salah satu bentuk umum dari pengujian ini adalah pengamatan bertahap terhadap peningkatan massa material setelah direndam dalam air, sehingga memungkinkan analisis terhadap laju penyerapan air, bukan hanya nilai totalnya. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian material kemasan, film, dan bioplastik yang dapat terdegradasi secara hayati, karena memberikan informasi penting mengenai ketahanan terhadap kelembaban, serta kemampuan retensi dan difusi air dalam struktur polimer (Caicedo dkk., 2022; Siti Xuan dkk., 2021).

Dalam praktiknya, uji *water uptake* dilakukan dengan cara merendam material ke dalam air pada suhu ruang, lalu dilakukan penimbangan berkala-

misalnya setiap 1 jam selama total 3 jam. data hasil penimbangan digunakan untuk menghitung persentase serapan air per waktu, dengan rumus berikut:

$$\text{Uji serap air (\%)} = \frac{(W_t - W_0)}{(W_0)} \times 100\% \quad (5)$$

Di mana, W_0 adalah berat awal material kering dan W_t adalah berat material pada waktu ke-t.

Hasil pengukuran kemudian dapat dirata-ratakan atau dianalisis sebagai kurva serapan terhadap waktu. Nilai water uptake yang tinggi menunjukkan struktur yang lebih terbuka dan ikatan tinggi dengan air, sementara nilai rendah mengindikasikan jaringan padat atau tahan air (Fekete dkk.,2020). Dengan demikian, uji ini memberikan gambaran kuantitatif tentang kemampuan material dalam berikatan dengan lingkungan berair, serta digunakan sebagai parameter kontrol kualitas dalam banyak aplikasi rekayasa material.

II.11.5 Uji Permeabilitas Uap Air

Uji *Water Vapor Transmission Rate (WVTR)* adalah metode untuk mengukur laju pergerakan uap air yang melintasi suatu material per satuan luas dan waktu dalam kondisi perbedaan kelembapan. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan suatu lapisan atau film dalam menghalangi difusi uap air, dan digunakan secara luas dalam karakterisasi material pelapis, film, serta kemasan. WVTR merupakan parameter penting dalam menentukan daya tahan suatu material terhadap kelembapan lingkungan, khususnya pada aplikasi yang menuntut kontrol kelembapan untuk menjaga kestabilan produk, seperti makanan segar, obat-obatan, atau perangkat elektronik (ASTM E96, 2016).

Secara kuantitatif, WVTR dihitung berdasarkan laju peningkatan massa uap air yang melewati permukaan material, biasanya melalui metode gravimetrik, desikator, atau cawan perendaman. Rumus perhitungannya adalah:

$$WVTR = \frac{\Delta W}{A \times t} \quad (6)$$

Dengan, ΔW ialah perubahan berat (g) akibat perpindahan uap air, A adalah luas permukaan efektif transmisi (m^2), dan t adalah waktu (hari atau jam).

Nilai WVTR dinyatakan dalam satuan umum seperti $g/m^2 \cdot day$ atau $g/m^2 \cdot h$. Nilai yang lebih rendah menunjukkan fungsi penghalang uap air yang lebih baik, sedangkan nilai tinggi menunjukkan material lebih mudah ditembus uap. Dengan demikian, WVTR menjadi indikator utama dalam menilai kinerja perlindungan kelembaban suatu material, tanpa perlu memperhitungkan ketebalan atau gradien tekanan uap secara langsung seperti pada WVP.

II.11.6 Uji Kadar Air

Kadar air merupakan parameter penting dalam karakterisasi film bioplastik, karena berpengaruh langsung terhadap kestabilan fisik, sifat mekanik, dan umur simpan produk. Kadar air didefinisikan sebagai persentase massa air yang tertahan dalam suatu bahan terhadap massa awalnya, baik dalam bentuk air bebas maupun air terikat secara fisik maupun kimiawi (Gontard dkk.,1994). Dalam sistem film biopolimer seperti kitosan, PVA, atau alginat, air dapat terserap melalui gugus hidrofilik dan menyebabkan perubahan struktur atau kinerja fungsional film tersebut.

Tujuan utama dari pengujian kadar air adalah untuk menilai efektivitas proses pengeringan serta mengevaluasi kestabilan film terhadap kelembapan lingkungan. Kadar air yang tinggi dapat menyebabkan pelunakan matriks polimer, penurunan

kekuatan tarik, peningkatan transmisi uap air, serta meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme selama penyimpanan (Guilbert dkk.,1996). Sebaliknya, kadar air yang terlalu rendah dapat menyebabkan film menjadi kaku dan mudah rapuh, khususnya jika tidak didukung oleh penggunaan *plasticizer* yang memadai seperti gliserol (Müller dkk.,2012).

Pengukuran kadar air biasanya dilakukan dengan metode gravimetri, yaitu pengeringan sampel dalam oven pada suhu 105 °C hingga berat konstan tercapai. Selisih berat antara sebelum dan sesudah pengeringan digunakan untuk menghitung kadar air. Rumus perhitungannya sebagai berikut:

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{(W_i - W_f)}{(W_i)} \times 100\% \quad (7)$$

Dimana, W_i adalah berat awal film sebelum pengeringan dan W_f adalah berat film setelah pengeringan

Hasil dari pengujian ini tidak hanya memberikan nilai numerik, tetapi juga diinterpretasikan secara kualitatif. Film dengan kadar air tinggi biasanya terasa lembek, licin, dan fleksibel berlebih, tetapi kurang kuat dan lebih mudah terdegradasi. Sebaliknya, film dengan kadar air rendah tampak lebih kaku dan kering, namun dapat menjadi terlalu rapuh jika tidak didukung oleh struktur polimer yang cukup plastis (Fabra dkk.,2010).

Pengaruh kadar air juga tampak pada penampilan visual film, seperti terbentuknya noda air, ketidakseragaman permukaan, atau penyusutan yang tidak merata. Oleh karena itu, analisis kadar air memegang peran penting dalam mengevaluasi keberhasilan formulasi, ketepatan proses pengeringan, dan prediksi ketahanan film dalam berbagai kondisi penyimpanan.

Dengan demikian, pengujian kadar air merupakan tahapan penting dalam pengembangan dan evaluasi bioplastik, baik sebagai indikator kualitas akhir produk maupun sebagai dasar optimasi proses produksi

II.11.7 Uji Porositas

Porositas merupakan parameter penting dalam mengevaluasi struktur mikro dan performa fungsional film bioplastik. Porositas didefinisikan sebagai persentase volume rongga atau ruang kosong dalam suatu bahan terhadap total volumenya. Dalam konteks film polimer, porositas berpengaruh terhadap transmisi uap air, sifat mekanik, dan ketahanan terhadap kelembapan. Film dengan struktur padat umumnya memiliki porositas rendah, memberikan kekuatan mekanik dan ketahanan penghalang yang lebih baik, sedangkan film berpori cenderung lebih lemah secara struktural dan lebih mudah menyerap air (Gontard dkk.,1994; Müller dkk.,2012).

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengukuran porositas melalui perendaman film dalam air selama 24 jam pada suhu ruang, yang bertujuan untuk mengukur banyaknya air yang diserap ke dalam pori-pori film. Metode ini mengasumsikan bahwa seluruh peningkatan massa setelah perendaman berasal dari air yang mengisi ruang pori. Teknik ini efektif untuk memperkirakan porositas terbuka, yaitu pori-pori yang terhubung langsung dengan permukaan film (Jiménez dkk.,2012).

Porositas dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Porositas (\%)} = \frac{(W_t - W_0)}{(\rho_{\text{air}} \times V)} \times 100\% \quad (8)$$

Dimana, W_0 ialah berat film kering sebelum perendaman, W_t adalah berat film setelah perendaman, P_{air} adalah massa jenis air, V adalah volume film (cm^3)

II.11.8 Uji Pengembangan

Derajat pengembangan (*Swelling*) merupakan parameter penting dalam karakterisasi film bioplastik, yang menggambarkan kemampuan film untuk mengalami perubahan dimensi setelah berikatan dengan pelarut cair dalam jangka waktu tertentu. Ketika film direndam dalam pelarut seperti air, molekul air akan berdifusi ke dalam jaringan polimer dan menyebabkan pembengkakan pada struktur internal film. Proses ini mengarah pada peningkatan volume dan perubahan bentuk film, tergantung pada sifat kimia dan fisik dari bahan penyusunnya (Sothornvit & Krochta, 2000).

Pengujian derajat pengembangan bertujuan untuk mengetahui sejauh mana film mampu menyerap cairan tanpa mengalami deformasi bentuk yang signifikan. Kemampuan suatu film dalam mempertahankan bentuknya sangat berkaitan dengan kestabilan dimensi film tersebut selama penggunaan. Film dengan struktur polimer yang rapat dan ikatan silang yang kuat akan memiliki nilai pengembangan yang rendah, yang menunjukkan ketahanan terhadap kelembapan. Sebaliknya, film dengan struktur yang longgar atau memiliki afinitas tinggi terhadap air akan menunjukkan nilai pengembangan yang tinggi, yang dapat menyebabkan hilangnya kestabilan bentuk (Jiménez dkk., 2012).

Salah satu metode untuk menentukan derajat pengembangan adalah dengan cara merendam film dalam air selama 24 jam pada suhu ruang, kemudian mengukur diameter film sebelum dan sesudah perendaman. Nilai derajat pengembangan dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Swelling (\%) = \frac{D_t}{D_0} \times 100\% \quad (9)$$

Dimana, D_0 adalah diameter film sebelum perendaman dan D_t adalah diameter film setelah perendaman

Rumus ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan dimensi linier film sebagai akibat ikatan dengan cairan. Pendekatan ini telah digunakan dalam berbagai penelitian sebelumnya, seperti yang dijelaskan oleh Lusiana dkk.,(2019), yang mengukur perubahan diameter film kitosan sebelum dan sesudah perendaman untuk menentukan derajat pengembangan. Metode serupa juga dilaporkan oleh Zhuang dkk.,(2013) dan Pandey & Rasheed (2012) dalam kajian film biopolimer berbasis kitosan dan alginat.

Nilai derajat pengembangan yang tinggi menandakan bahwa air berhasil menembus dan memperluas jaringan polimer secara signifikan. Hal ini biasanya terjadi pada film yang mengandung polimer hidrofilik tanpa penguatan struktur melalui *crosslinking*. Sebaliknya, nilai pengembangan yang rendah menunjukkan bahwa film memiliki daya tahan terhadap perubahan bentuk dan kestabilan dimensi yang baik. Oleh karena itu, pengujian ini tidak hanya menunjukkan tingkat afinitas film terhadap cairan, tetapi juga menjadi indikator penting dalam menentukan kesesuaian film untuk aplikasi tertentu, seperti pengemasan pangan atau pembungkus produk basah.

II.11.9 Uji Biodegradasi

Biodegradasi adalah proses alami penguraian material oleh aktivitas mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, atau enzim, menjadi senyawa sederhana seperti air, karbon dioksida, dan biomassa. Dalam konteks film bioplastik,

biodegradasi mencerminkan kemampuan material untuk terurai secara hayati dalam lingkungan tanpa meninggalkan residu berbahaya atau polimer yang tidak terpecah (Kale dkk.,2007).

Pengujian biodegradasi bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana film bioplastik dapat diuraikan oleh aktivitas mikroorganisme dalam media tertentu, seperti tanah, kompos, atau air. Kemampuan terdegradasi ini menjadi indikator utama sifat ramah lingkungan suatu film, dan sangat relevan dalam pengembangan kemasan sekali pakai yang diharapkan tidak mencemari lingkungan setelah digunakan.

Film yang bersifat *biodegradable* akan mengalami penurunan massa, perubahan struktur, dan penurunan integritas fisik selama periode pengujian. Salah satu metode umum untuk menilai biodegradasi adalah dengan menghitung persentase kehilangan berat (%WL) setelah film direndam atau dikubur dalam media uji. Rumus yang digunakan adalah:

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{(W_0 - W_t)}{(W_t)} \times 100 \quad (10)$$

Dimana, W₀ adalah berat awal film sebelum penguburan, dan W_t adalah berat film setelah penguburan

Nilai %WL yang tinggi menunjukkan tingkat biodegradasi yang cepat dan efisien, sedangkan nilai yang rendah menandakan bahwa film sulit terurai dalam lingkungan uji. Selain kehilangan berat, beberapa studi juga memantau perubahan morfologi permukaan menggunakan mikroskop atau uji spektroskopi untuk mendeteksi degradasi struktur polimer (Arrieta dkk.,2014).

Tingkat biodegradasi sangat dipengaruhi oleh komposisi film. Film yang berbasis bahan alami seperti kitosan, pati, atau alginat umumnya memiliki kemampuan terdegradasi lebih tinggi dibandingkan film berbasis sintetik atau dengan kadar *crosslink* yang tinggi. Penambahan zat seperti kalsium, plastikiser, atau agen silang dapat meningkatkan sifat mekanik namun kadang menurunkan tingkat biodegradasi karena memperkuat ikatan antar rantai polimer (Sanyang dkk.,2016).

Pengujian biodegradasi sangat relevan dalam pengembangan film untuk pengemasan ramah lingkungan, khususnya dalam mengurangi polusi plastik konvensional. Film yang dapat terurai secara alami tanpa perlakuan kimia tambahan akan lebih sesuai untuk aplikasi sekali pakai dalam industri pangan, pertanian, dan medis.

II.11.10 Uji FTIR

Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) adalah metode karakterisasi yang digunakan untuk menganalisis struktur kimia suatu senyawa berdasarkan ikatan antara molekul dan radiasi inframerah. Ketika cahaya inframerah diserap oleh senyawa, terjadi eksitasi vibrasi ikatan dalam molekul, menghasilkan spektrum khas yang disebut spektrum serapan inframerah. Setiap jenis gugus fungsi memiliki rentang serapan yang spesifik, sehingga FTIR dapat digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsional seperti -OH, -NH₂, -COOH, dan gugus lainnya (Smith, 2011). Misalnya, pita serapan gugus hidroksil dan amina umumnya muncul pada 3200-3500 cm⁻¹, sementara gugus karbonil dan karboksilat berada pada 1600-1700 cm⁻¹.

Selain identifikasi struktur, FTIR juga digunakan untuk menganalisis perubahan kimia akibat reaksi atau modifikasi, seperti pembentukan ikatan baru, hilangnya gugus tertentu, atau perubahan lingkungan molekul. Pergeseran posisi puncak, perubahan intensitas, atau munculnya pita baru dapat mengindikasikan terjadinya ikatan atau ikatan antar gugus tertentu (Pavia dkk.,2015). Interpretasi spektrum FTIR secara kualitatif menjadi alat penting dalam menentukan apakah struktur senyawa telah berubah, apakah reaksi berjalan sesuai rencana, dan apakah terdapat indikasi pembentukan atau penghilangan gugus fungsi tertentu. Dengan demikian, FTIR tidak hanya digunakan untuk mengenali senyawa, tetapi juga sebagai alat verifikasi dan kontrol kualitas struktur kimia dalam berbagai bidang penelitian material.

II.11.11 Uji XRD

X-ray Diffraction (XRD) adalah teknik karakterisasi struktural yang digunakan untuk mengidentifikasi susunan atom, derajat kristalinitas, dan struktur internal suatu material padat berdasarkan prinsip difraksi sinar-X. Dalam bidang polimer dan bioplastik, XRD berperan penting dalam menentukan apakah film bersifat kristalin, amorf, atau semi-kristalin, serta mendeteksi perubahan struktur akibat modifikasi formulasi atau proses (Sanyang dkk.,2016).

Prinsip dasar XRD didasarkan pada hukum Bragg, yang menyatakan bahwa difraksi maksimum akan terjadi jika sinar-X dipantulkan oleh bidang kristal yang terpisah sejauh d , dengan sudut data θ , sehingga memenuhi persamaan:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (11)$$

Dimana, d ialah jarak antar bidang kristal (d -spacing) dan θ adalah sudut Bragg

Persamaan ini digunakan untuk menghitung jarak antar bidang kristal dalam satuan nanometer atau Ångström. Pola difraksi yang dihasilkan (grafik intensitas vs. sudut 2θ) menunjukkan puncak-puncak khas yang menggambarkan keteraturan molekul dalam material. Puncak yang tajam menandakan sifat kristalin tinggi, sedangkan puncak lebar atau pola menyebar menunjukkan struktur amorf atau semi-kristalin (Jiménez dkk.,2012).

Film bioplastik yang tersusun dari bahan seperti kitosan, PVA, atau alginat umumnya menunjukkan karakter semi-kristalin, yang dapat berubah jika diformulasikan dengan *plasticizer* , agen silang (*crosslinker*), atau nanopartikel. XRD menjadi metode yang sensitif untuk mendeteksi perubahan tersebut, terutama dalam membandingkan efek perlakuan terhadap kristalinitas, stabilitas struktur, dan homogenitas bahan (Arrieta dkk.,2014).

Selain itu, XRD juga dapat digunakan untuk menghitung ukuran kristalit menggunakan persamaan Scherrer:

$$L = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (12)$$

Dalam persamaan ini, L adalah ukuran kristalit, K merupakan konstanta Scherrer (0,89), λ adalah panjang gelombang sinar-X, β adalah lebar puncak difraksi pada setengah tinggi maksimum (FWHM) dalam radian, dan θ adalah sudut Bragg. Persamaan ini digunakan untuk memperkirakan ukuran domain kristalin berdasarkan data XRD.

BAB III

METODE PENELITIAN

III.1 Variabel Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik, Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro dari bulan Oktober 2024 sampai Mei 2025. Dalam penelitian ini, dilakukan pembuatan, karakterisasi dan aplikasi pada pengemasan buah segar film bioplastik. Pada penelitian ini terdapat variabel yaitu variabel tetap, variabel berubah dan variabel terukur.

III.1.1 Variabel Tetap

Variabel tetap pada penelitian ini, yaitu:

1. Persen konsentrasi kitosan : 2%
2. Persen konsentrasi poli(vinil alkohol): 1,5%
3. Persen konsentrasi natrium alginat : 2%
4. Persen konsentrasi gliserol : 7,5%
5. Persen Konsentrasi *Sodium tripolyphosphate* : 0,1%

III.1.2 Variabel Berubah

Rasio campuran Ca (0 mg-10 mg) dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Tabel III. 1 Rasio Komposisi Bioplastik

Film	CS (%)	PVA (%)	STPP (%)	NA (%)	Gliserol (%)	Ca (mg/10mL)
Ca 0 mg	2	1,5	0,1	1	7,5	0
Ca 2,5 mg	2	1,5	0,1	1	7,5	2,5
Ca 5 mg	2	1,5	0,1	1	7,5	5
Ca 7,5 mg	2	1,5	0,1	1	7,5	7,5
Ca 10 mg	2	1,5	0,1	1	7,5	10

III.1.3 Variabel Terukur

Variabel yang dinilai pada penelitian ini yaitu parameter fisik dan kimia meliputi uji: gugus fungsi dengan FTIR, struktur kristalin dengan XRD uji berat dan ketebalan, kuat Tarik, hidrofilisitas, serap air, pengembangan (*Swelling*), transmisi uap air, porositas, kadar air, biodegradabilitas, pengaplikasian daya tahan simpan.

III.2 Bahan dan Alat

III.2.1 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Kitosan (BM: 40.000 g/mol, Surindo *Biotech*, Cirebon)
2. Poli(vinil alkohol) (BM: 125.000 g/mol; Merck)
3. Natrium Alginat (BM; 216,12 g/mol; Merck)
4. Cangkang telur (BM; 100,09 g/mol)
5. Gliserol (BM; 92,09 g/mol)
6. *Sodium tripolyphosphate* (BM; 367,86 g/mol; Sigma aldrich)
7. Asam asetat p.a (BM; 60,052 g/mol; Merck)
8. NaOH(s) (BM; 39,997 g/mol; Merck)
9. Aseton (*Sigma Aldrich*)
10. HCl (*Merck*)
11. akuades

III.2.2 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Alat gelas standar penelitian (*Herma* dan *Pyrex*),
2. Cawan petri (*Sterilplan*)
3. *Magnetic stirrer* (*Biomega* dan *Jenway*)
4. Neraca analitik (*OHAUS*)
5. Seperangkat alat cetak film
6. Ayakan ukuran mesh 80
7. Lumpang Alu
8. *Grinder*
9. pH meter (ph-009(1)A PEN TYPE)
10. *Ultrasonic Bath Homogenizer*
11. *Thicknessmeter* (*Mitutoyo*)
12. *Furnace* (*thermolyne*)
13. *Hotplate*
14. Oven *memmert*
15. *Tensile strength analyzer*
16. Spektrofotometer FTIR
17. Spektrofotometer UV-Vis (*lw v-200-rs*)
18. Instrumen FTIR (FTIR *PerkinElmer Frontier*)
19. Instrument XRD

III.3 Prosedur Penelitian

III.3.1 Sintesis Larutan Kalsium Asetat dari Canggang Telur

Metode sintesis larutan kalsium asetat dalam penelitian ini mengacu pada Seesanong et al. (2024) dengan beberapa modifikasi, yaitu menggunakan kalsium oksida (CaO) hasil kalsinasi dari cangkang telur dan pelarutan dalam larutan asam asetat encer pada suhu ruang. Canggang telur yang telah dibersihkan dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 2 jam. Setelah tahap pengeringan, cangkang dikalsinasi menggunakan *furnace* pada suhu 825 °C selama 2 jam untuk mengubah senyawa utama berupa kalsium karbonat (CaCO_3) menjadi kalsium oksida (CaO) melalui reaksi dekomposisi termal.

Padatan hasil kalsinasi kemudian digiling dan diayak menggunakan ayakan berukuran 80 mesh untuk memperoleh serbuk CaO dengan ukuran partikel yang seragam. Massa serbuk CaO sesuai variasi yang tercantum pada Tabel III.1 dilarutkan ke dalam 10 mL larutan asam asetat 1% (v/v), kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 45 menit pada suhu ruang. Proses pelarutan dilakukan dalam kondisi kelebihan asam asetat guna memastikan seluruh kalsium bereaksi sempurna dan menghasilkan larutan kalsium asetat ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) yang homogen.

III.3.2 Pembuatan Larutan CH_3COOH 1%

Melarutkan 2,5 mL asam asetat glasial ke dalam 250 mL akuades. Campuran tersebut kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik (*magnetic stirrer*) hingga mencapai keadaan homogen.

III.3.3 Pembuatan Larutan Kitosan 2%

Sebanyak 2 g kitosan dilarutkan ke dalam 100 mL larutan asam asetat 1%. Campuran tersebut kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 2 jam pada suhu 70°C.

III.3.4 Pembuatan Larutan PVA 1,5%

Sebanyak 1,5 g PVA dilarutkan ke dalam 100 mL akuades. Campuran tersebut kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 3 jam pada suhu 70°C.

III.3.5 Pembuatan Larutan Natrium Alginat 1%

Sebanyak 1 g natrium alginat dilarutkan ke dalam 100 mL akuades. Campuran tersebut kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 2 jam pada suhu 60°C.

III.3.6 Pembuatan Larutan *Sodium tripolyphosphate* 0,1%

Sebanyak 0,1 g STPP dilarutkan ke dalam 100 mL akuades. Campuran tersebut kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 30 menit pada suhu ruang.

III.3.7 Pembuatan Larutan Kitosan-PVA

Sebanyak 20 mL larutan kitosan 1,5% yang telah dilarutkan dalam larutan asam asetat 1% dimasukkan ke dalam gelas beaker. Selanjutnya, ditambahkan 15 mL larutan PVA 1,5% yang telah dilarutkan dalam akuades. Kedua larutan tersebut kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 2 jam pada suhu 80°C. Setelah itu, campuran disonikasi selama 30 menit pada suhu ruang untuk meningkatkan homogenitas.

III.3.8 Pembuatan Larutan Taut silang Kitosan - STPP

Sebanyak 20 mL larutan kitosan 2% yang telah dilarutkan dalam larutan asam asetat 1% dimasukkan ke dalam gelas beaker. Larutan tersebut kemudian

dicampurkan dengan 15 mL larutan PVA 1,5% yang telah dilarutkan dalam akuades. Campuran diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 2 jam pada suhu 60 °C. Setelah tercampur merata, sebanyak 5,44 mL larutan STPP 0,1% ditambahkan secara perlahan sambil tetap diaduk selama 4 jam pada suhu 65 °C. Proses dilanjutkan dengan sonikasi selama 30 menit pada suhu ruang untuk meningkatkan homogenitas larutan.

III.3.9 Pembuatan Larutan Natrium Alginat -Gliserol

Sebanyak 10 mL larutan natrium alginat 1% yang telah dilarutkan dalam akuades dimasukkan ke dalam gelas beaker. Larutan tersebut dicampurkan dengan 10 mL larutan kalsium dengan variasi konsentrasi sesuai Tabel III.1, kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 45 menit pada suhu ruang. Setelah proses pencampuran awal, sebanyak 4,5 mL gliserol ditambahkan ke dalam larutan dan diaduk kembali menggunakan pengaduk magnetik selama 90 menit pada suhu 65 °C. Campuran akhir disonikasi selama 30 menit pada suhu ruang untuk meningkatkan homogenitas larutan.

III.3.10 Pembuatan film Film Tipis

Pembuatan film dilakukan menggunakan metode Layer-by-Layer (LbL) melalui proses penuangan dua lapisan secara bertahap ke dalam cetakan. Lapisan pertama dibentuk dengan menuangkan 40,44 mL larutan kitosan-PVA-STPP, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 60 °C selama 4 jam. Setelah lapisan pertama mengering sempurna, sebanyak 24,5 mL larutan natrium alginat-gliserol-kalsium dituangkan sebagai lapisan kedua, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu yang sama selama 4 jam. Setelah kedua lapisan terbentuk, permukaan film diberi perlakuan dengan penambahan 10 mL larutan NaOH 2 M dan didiamkan selama 24

jam. Film yang telah terbentuk kemudian dinetralkan hingga mencapai pH netral dan disimpan pada suhu ruang hingga benar-benar kering. Seluruh prosedur dilakukan secara konsisten untuk setiap variasi konsentrasi kalsium asetat.

III.3.11 Karakterisasi film Bioplastik

III.12.1 Uji Berat dan Ketebalan

Pengukuran berat film dilakukan menggunakan neraca analitik OHAUS, di mana setiap sampel ditimbang sebanyak tiga kali untuk setiap pengulangan. Presentase berat film yang diperoleh kemudian dihitung rata-ratanya sesuai dengan persamaan (1) untuk menentukan berat film. Selanjutnya, ketebalan film diukur menggunakan *thickness meter* dengan melakukan tiga kali pengukuran pada tiga titik yang berbeda. Presentase yang diperoleh kemudian dihitung rata-ratanya berdasarkan persamaan (2) untuk menentukan ketebalan masing-masing film.

III.12.2 Uji Kuat Tarik

Film hasil sintesis dengan ukuran 12×3 cm diuji untuk menentukan kekuatan tarik dan persen elongasi menggunakan *tensile strength analyzer* sesuai dengan standar ASTM D822. Kekuatan tarik ditentukan berdasarkan beban maksimum yang diterima oleh film saat ditarik hingga mengalami robekan, sedangkan persentase pemanjangan dihitung berdasarkan perubahan panjang film pada saat pemutusan. Presentase yang diperoleh dari pengujian kekuatan tarik dianalisis menggunakan persamaan (3) dan (4).

III.12.3 Uji Hidrofilisitas

Pengukuran sudut kontak merupakan metode yang digunakan untuk menentukan sifat hidrofilisitas suatu film. Dalam prosedur ini, setetes akuades ditetaskan secara perlahan pada permukaan sampel film yang telah diletakkan di

atas cawan petri dengan latar belakang hitam, menggunakan jarum suntik mikro. Gambar tetesan air pada permukaan film kemudian diambil dengan sudut kamera sejajar dengan permukaan film. Selanjutnya, sudut yang terbentuk antara tetesan air dan permukaan film diukur pada kedua sisi menggunakan metode perhitungan trigonometri dengan penganalisis sudut kontak.

III.12.4 Uji Serap Air

Pengujian serapan uap air dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan film dalam menyerap kelembapan dari lingkungan. Dalam prosedur pengujian, setiap film yang akan diuji ditimbang menggunakan neraca analitik untuk memperoleh berat awal. Film kemudian ditempatkan dalam toples yang berisi 10 mL akuades dan dibiarkan selama 6 jam. Setiap satu jam, film diambil dan ditimbang kembali menggunakan neraca analitik, lalu dimasukkan kembali ke dalam toples berisi akuades. Berat film sebelum dan sesudah pengujian digunakan untuk menentukan persentase serapan uap air film. Nilai serapan uap air dihitung menggunakan persamaan (5).

III.12.5 Uji Permeabilitas Uap Air Air (*Water Vapour Permeability Rate*)

Pengujian permeabilitas uap air (*Water Vapor Permeability Rate*, WVPR) merupakan salah satu sifat penting dalam kemasan makanan primer. Dalam prosedur ini, sampel film dipasang pada *nozzle* tabung menggunakan selotip, dengan volume air yang sama, yaitu 10 mL, di dalamnya. Berat awal tabung, termasuk air dan film, dicatat sebelum tabung ditempatkan dalam oven pada suhu 80°C selama 24 jam. Setelah proses inkubasi, tabung dikeluarkan dari oven dan ditimbang untuk memperoleh berat akhir. Nilai WVPR dihitung menggunakan persamaan (6).

III.12.6 Uji Kadar Air

Pengujian kadar air pada bioplastik dilakukan menggunakan metode gravimetri dengan tujuan menentukan kandungan air dalam sampel, yang berpengaruh terhadap sifat fisik dan stabilitas bioplastik. Dalam prosedur pengujian, film bioplastik berukuran 3×4 cm dipotong dan ditimbang untuk memperoleh berat awal, kemudian ditempatkan dalam kaca arloji yang telah ditimbang sebelumnya dan diinkubasi dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam untuk menguapkan kandungan air dalam film. Setelah inkubasi, kaca arloji beserta film dikeluarkan dari oven, dan berat akhirnya film dicatat. Kadar air dalam film kemudian dihitung menggunakan persamaan (7).

III.12.7 Uji Porositas

Pengujian porositas pada bioplastik dilakukan untuk menentukan tingkat kerapatan dan daya serap material terhadap cairan, yang berpengaruh terhadap sifat mekanis, permeabilitas, dan ketahanan bioplastik dalam berbagai kondisi lingkungan. Dalam prosedur pengujian, film bioplastik dipotong dengan ukuran 3×4 cm dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam hingga mencapai berat konstan. Sampel film yang telah kering kemudian direndam dalam 10 mL air suling selama 24 jam, lalu dikeringkan kembali dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam hingga benar-benar kering. Setelah proses pengeringan, film ditimbang kembali menggunakan neraca analitik untuk memperoleh nilai berat awal. Persentase porositas film dihitung menggunakan persamaan (8).

III.12.8 Uji Pengembangan (*Swelling*)

Pengujian derajat pengembangan (*Swelling degree*) pada bioplastik dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menyerap cairan, yang

berpengaruh terhadap sifat mekanis, ketahanan, dan stabilitas bioplastik dalam kondisi lembap. Dalam prosedur pengujian, setiap film diukur diameternya menggunakan penggaris besi untuk memperoleh diameter awal (I_o). Selanjutnya, film direndam dalam 10 mL akuades selama 24 jam dalam cawan petri. Setelah perendaman, diameter film diukur kembali untuk memperoleh diameter akhir (I_t). Persentase derajat penggembungan dihitung menggunakan persamaan (9).

III.12.9 Uji Biodegradabilitas

Pengujian degradabilitas bahan kemasan dilakukan untuk mengevaluasi tingkat biodegradasi material dalam lingkungan tanah, yang penting dalam menilai dampak lingkungan dan ketahanan bioplastik setelah dibuang. Metode yang digunakan adalah pengujian penguburan tanah, di mana sampel film dikubur dalam tanah selama periode tertentu, dan penurunan beratnya diukur sebagai fungsi waktu. Sampel film berbentuk persegi panjang berukuran 4×4 cm ditimbang untuk mencatat berat awal, kemudian dikubur dalam wadah kotak berisi tanah dengan jumlah yang sama, pada kedalaman 3 cm dari permukaan. Kelembapan tanah dijaga dengan menambahkan volume air yang sama ke setiap wadah. Sampel diambil secara berkala pada interval waktu tertentu (setiap 7 hari) dengan posisi pengambilan yang telah ditandai. Setelah dikeluarkan, sisa tanah di permukaan sampel dibersihkan menggunakan air, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 15 menit hingga mencapai berat konstan. Setelah proses pengeringan, berat akhir sampel dicatat, dan persentase penurunan berat atau tingkat degradasi dihitung menggunakan persamaan (10).

III.12.10 Karakterisasi FTIR

Analisis gugus fungsi film hasil sintesis dilakukan menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Penggunaan instrumen FTIR Spektrum IRSpirit-X Series bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terkandung dalam komponen film. Spektrum inframerah direkam pada suhu ruang dalam rentang bilangan gelombang 400 hingga 4000 cm^{-1}

III.12.11 Uji Struktur Kristalin (XRD)

Pengujian *X-ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk menganalisis struktur kristal film berbasis SACS, yang berpengaruh terhadap sifat fisik dan mekanis material. Dalam prosedur pengujian, sampel dipotong dengan ukuran 3×3 cm sebelum dilakukan analisis menggunakan perangkat *Bruker D8 Discover*, yang beroperasi pada tegangan 40 kV. Pengukuran dilakukan dalam rentang sudut 2-theta (2θ) dari 5° hingga 50° , dengan sumber sinar-X berupa radiasi tembaga ($\text{K}\alpha$) yang memiliki panjang gelombang 1,5418 Å. Data difraksi dikumpulkan dengan kecepatan pemindaian 0,500 detik per titik untuk memastikan akurasi hasil analisis struktur kristal sampel dan perhitungan hasil d-spacing serta ukuran kristalinitas menggunakan persamaan (11) dan (12).

III.3.12 Pengaplikasian Film pada Buah Tomat

Buah tomat segar diperoleh dari pasar tradisional di Semarang, Indonesia, lalu dibawa ke laboratorium untuk pengujian. Setiap sampel ditempatkan dalam stoples, dan film bioplastik berdiameter 8 cm ditempelkan pada permukaan tomat. Stoples diinkubasi pada suhu ruang, dan perubahan warna serta kondisi fisik buah diamati secara berkala dan didokumentasikan menggunakan kamera.

BAB IV

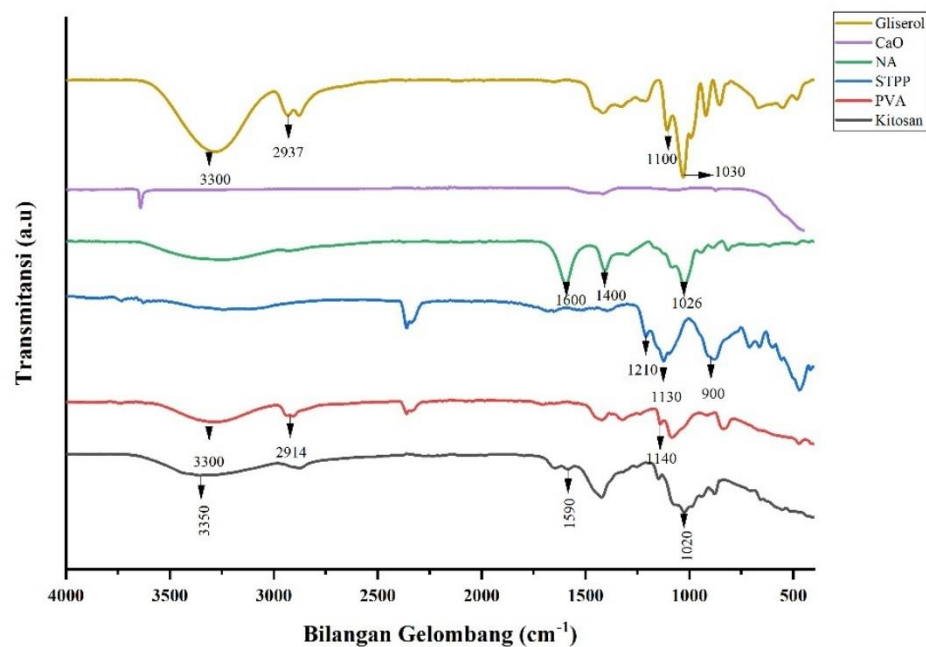
HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Identitas Gugus Fungsi

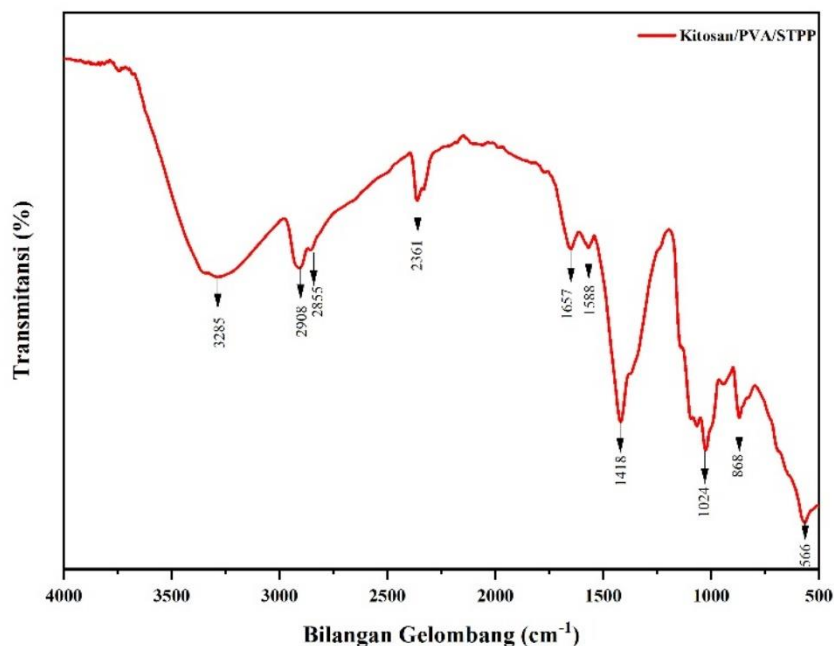
Analisis spektrum *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan untuk memahami karakter kimia dari masing-masing bahan penyusun film bioplastik multilapis. Tujuan analisis ini adalah mengidentifikasi gugus fungsional khas dari setiap bahan serta menelusuri kemungkinan terbentuknya ikatan antarmolekul, baik melalui mekanisme ionik maupun hidrogen. Spektra hasil pengukuran ditampilkan pada Gambar IV.1 dan mencakup kitosan, poli(vinil alkohol) (PVA), natrium tripolifosfat (STPP), natrium alginat, kalsium oksida (CaO), dan gliserol.

Spektrum kitosan menunjukkan pita khas pada 1590 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi pembengkokan gugus amina primer ($-\text{NH}_2$), serta pita lebar pada 3350 cm^{-1} yang merepresentasikan regangan gugus hidroksil (O-H) dan amina (N-H). Kedua gugus tersebut berperan dalam pembentukan ikatan silang, baik melalui interaksi ionik dengan gugus fosfat dari STPP maupun ikatan hidrogen dengan PVA dan gliserol. Spektrum PVA menampilkan pita serapan pada $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ (O-H), 2940 cm^{-1} (C-H), dan 1140 cm^{-1} (C-O), mengindikasikan keberadaan gugus polar dengan potensi pembentukan ikatan hidrogen. STPP menunjukkan pita karakteristik pada $1210\text{--}1130\text{ cm}^{-1}$ untuk gugus fosfat P=O dan P-O-P , serta pita tambahan di bawah 900 cm^{-1} untuk gugus P-O , menandakan peran STPP sebagai agen pengikat silang dalam sistem kitosan.

Pita khas gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) pada natrium alginat muncul secara asimetris dan simetris di sekitar 1600 cm^{-1} dan 1400 cm^{-1} . Keberadaan pita ini menunjukkan keterlibatan gugus tersebut dalam pembentukan ikatan ionik dengan ion kalsium (Ca^{2+}) dari Ca. Ikatan Ca-O biasanya muncul di bawah 700 cm^{-1} , namun dalam spektrum alginat, pengaruh Ca^{2+} lebih terlihat melalui pergeseran pita. Gliserol menunjukkan pita lebar pada $3300\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ (O-H), serta pita pada 2930 cm^{-1} dan 1100 cm^{-1} yang berhubungan dengan gugus C-H dan C-O. Gugus tersebut mendukung pembentukan ikatan hidrogen antar polimer. Pengamatan pita-pita utama pada spektrum individu menunjukkan adanya interaksi kimia antarkomponen, yang selanjutnya dianalisis lebih lanjut pada spektrum film gabungan Gambar IV.2.



Gambar IV.1 Spektra FTIR Bahan



Gambar IV.2 Spektra FTIR Kitosan/PVA/STPP

Gambar IV.2 menunjukkan puncak serapan kuat di sekitar 3285 cm^{-1} yang merepresentasikan regangan tumpang tindih dari gugus hidroksil ($-\text{OH}$) milik PVA dan gugus amina primer ($-\text{NH}_2$) dari kitosan. Pita ini mengindikasikan karakteristik hidrofilik sistem biopolimer serta kemungkinan pembentukan ikatan hidrogen antarmolekul. Hasil ini sejalan dengan laporan Shaabani dan Moghadam (2022), yang menyatakan bahwa pita pada rentang $3354\text{--}3290\text{ cm}^{-1}$ merupakan indikasi keberadaan gugus $-\text{OH}$ dan $-\text{NH}_2$ dalam struktur kitosan-PVA yang mengalami *crosslinking* dengan STPP.

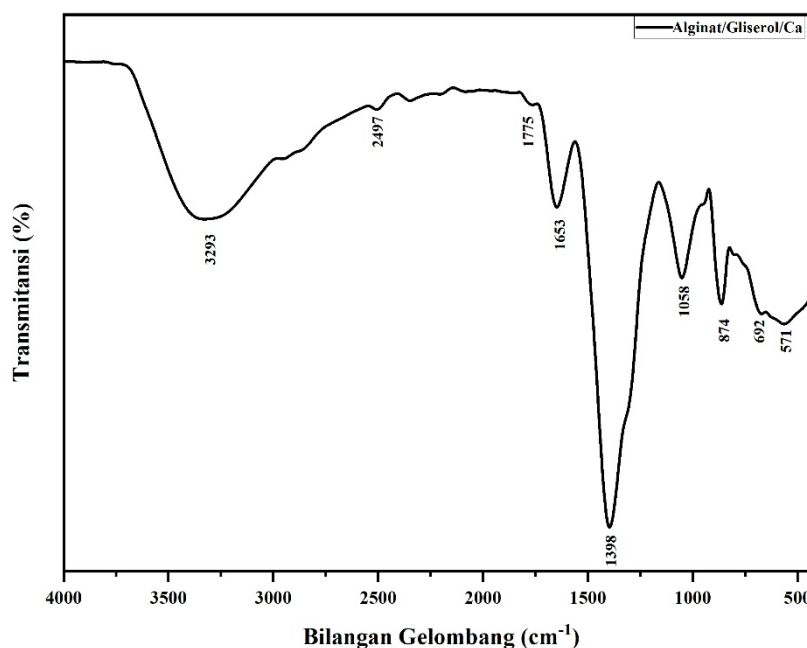
Puncak tajam pada 1657 cm^{-1} diidentifikasi sebagai regangan karbonil ($\text{C}=\text{O}$) dari gugus amida I, sedangkan pita pada 1588 cm^{-1} berkaitan dengan pembengkokan ikatan N-H dari amida II. Kedua sinyal ini merupakan karakteristik struktur kitosan yang mengalami deasetilasi sebagian. Penelitian Jiang et al. (2024) memperkuat temuan ini melalui observasi pita serupa pada sistem nanopartikel

kitosan-STPP, dengan puncak di 1658 dan 1589 cm^{-1} yang menandai pembentukan struktur amida dalam kondisi terikat silang.

Spektrum pada 1418 cm^{-1} menunjukkan adanya tekukan gugus -CH dari rantai hidrokarbon, yang menegaskan keberadaan PVA dalam sistem. Sinyal ini konsisten dengan temuan Shaabani dan Moghadam (2022), yang mengidentifikasi pita pada 1416 cm^{-1} sebagai ciri khas rantai karbon PVA dan kitosan yang terlibat dalam pembentukan jaringan polimer.

Puncak pada 1024 cm^{-1} dan 868 cm^{-1} masing-masing mencerminkan getaran simetris P-O dan getaran asimetris P-O-P dari gugus fosfat milik STPP. Keberadaan pita ini menunjukkan ikatan elektrostatik antara gugus amonium (-NH) dari kitosan dengan gugus fosfat STPP, yang berkontribusi terhadap pembentukan ikatan silang ionik. Jiang et al. (2024) juga melaporkan bahwa pita pada kisaran $1090\text{-}1019\text{ cm}^{-1}$ merupakan bukti kuat terbentuknya kompleks ionik dalam sistem kitosan-STPP.

Pergeseran dan perubahan intensitas pita-pita serapan dari gugus fungsional utama, seperti -OH , -NH_2 , C=O , dan P-O , menandakan terbentuknya ikatan antarmolekul melalui interaksi hidrogen dan ikatan silang ionik. Hasil ini mengonfirmasi bahwa formulasi film kitosan-PVA-STPP berhasil membentuk jaringan film secara struktural, sesuai dengan tujuan sintesis film bioplastik dalam penelitian ini. Bukti keberhasilan reaksi pada sistem alginat-gliserol-Ca ditampilkan pada Gambar IV.3.



Gambar IV.3 Spektra FTIR Alginat/Gliserol/Ca

Gambar IV.2 menunjukkan bahwa sistem alginat-gliserol- Ca^{2+} menghasilkan puncak serapan pada 1653 cm^{-1} dan 1398 cm^{-1} , yang merepresentasikan regangan asimetris dan simetris dari gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) pada rantai alginat. Keberadaan puncak tersebut mengindikasikan keterlibatan gugus karboksilat dalam pembentukan jaringan silang melalui ikatan ionik dengan ion kalsium (Ca^{2+}). Munculnya puncak tambahan pada 904 , 826 , dan 661 cm^{-1} memperkuat indikasi terbentuknya ikatan koordinasi Ca-O, yang menjadi ciri khas struktur *egg-box*. Braccini dan Pérez (2001) menyatakan bahwa pembentukan kompleks ionik antara Ca^{2+} dan gugus karboksilat menyebabkan perubahan vibrasi spesifik pada spektrum FTIR. Pernyataan ini didukung oleh Vieira dan Lopes da Silva (2017) serta Jeoh et al. (2021), yang mengidentifikasi vibrasi Ca-O pada wilayah bilangan gelombang di bawah 900 cm^{-1} sebagai indikator terbentuknya gel ionik dalam sistem alginat.

Puncak pada 1038 cm^{-1} dan 860 cm^{-1} menunjukkan vibrasi C-O dan C-H yang berasal dari gugus asam glukuronat dan gliserol. Keberadaan pita ini menunjukkan bahwa gliserol tidak hanya berfungsi sebagai *plasticizer*, tetapi juga berinteraksi secara non-kovalen dengan rantai polimer melalui gugus aktif seperti -OH dan -CH₂. Verduzco-Grajeda et al. (2024) melaporkan bahwa gugus tersebut umumnya muncul pada wilayah serapan tersebut dan berkontribusi dalam memperkuat stabilitas matriks film. Pita regangan O-H dan C-H yang muncul pada 3300 cm^{-1} dan 2930 cm^{-1} berasal dari gugus hidroksil gliserol dan rantai polisakarida alginat, yang berperan penting dalam pembentukan struktur film yang kompak dan seragam.

Interpretasi data spektra film disajikan pada Tabel IV.1, sedangkan pengaruh variasi massa Ca terhadap spektrum FTIR dapat dilihat pada Gambar IV.4.

Tabel IV.1 Interpretasi Spektra FTIR dengan penambahan variasi Ca

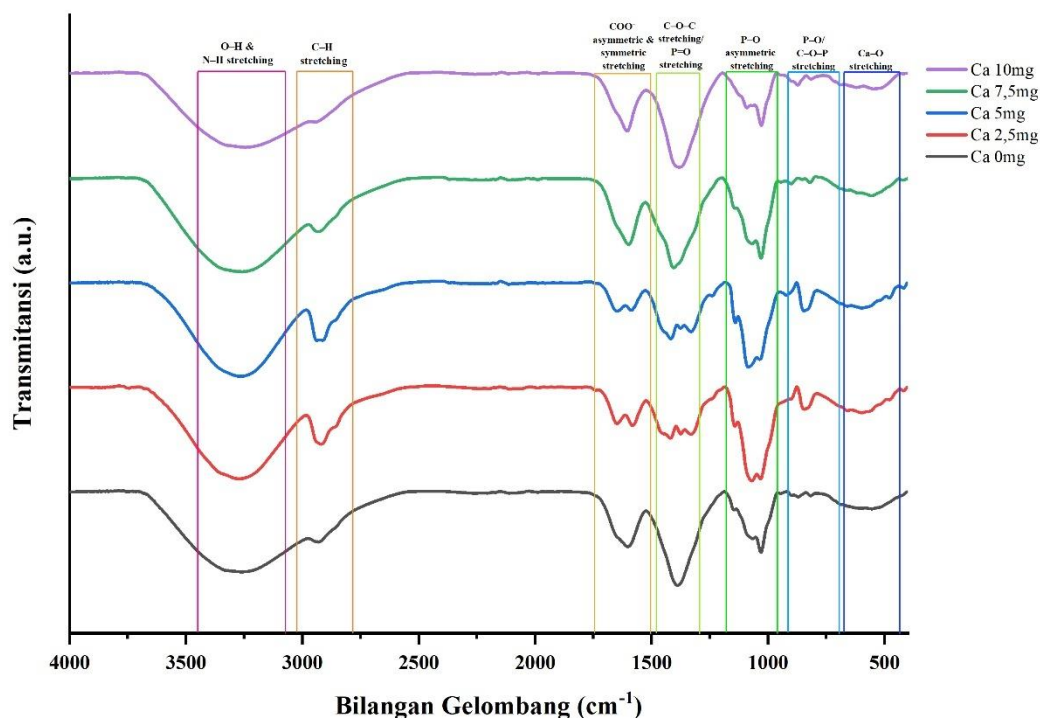
Gugus Fungsi	Jenis film/ Bilangan Gelombang (cm^{-1})				
	Ca 0 mg	Ca 2,5 mg	Ca 5 mg	Ca 7,5 mg	Ca 10 mg
O-H	3350	330	3310	3280	3250
C-H	2925	2922	2920	2915	2910
COO ⁻ (asimetris)	1598	1584	1578	1571	1563
COO ⁻ (simetris)	1388	1351	1346	1340	1333
P=O/P-O-C	1033/916	1033/916	1033/916	1033/916	1033/916
Ca-O	-	710	710/692	904/661	904/661

Tabel IV.1 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi kalsium (Ca) dari 0 hingga 10 mg menyebabkan perubahan sistematis pada posisi dan intensitas pita FTIR, khususnya pada gugus -COO⁻, -OH, dan -CH. Pita vibrasi gugus karboksilat (-COO⁻) yang awalnya muncul pada 1598 cm^{-1} (regangan asimetris) dan 1388 cm^{-1} (regangan simetris) pada formulasi tanpa Ca (Ca0) mengalami pergeseran bertahap

ke bilangan gelombang lebih rendah, yaitu 1584 cm^{-1} dan 1351 cm^{-1} pada Ca2,5, hingga mencapai 1563 cm^{-1} dan 1333 cm^{-1} pada Ca10. Pergeseran tersebut menunjukkan terbentuknya ikatan ionik antara gugus karboksilat dan ion Ca^{2+} , yang mengindikasikan keterlibatan kalsium dalam proses pembentukan jaringan silang pada matriks film.

Pergeseran pita ke bilangan gelombang lebih rendah secara spektral merepresentasikan penurunan energi vibrasi akibat pembentukan ikatan yang lebih fleksibel, serta adanya delokalisasi muatan sebagai hasil dari interaksi ionik. Intensitas pita serapan gugus hidroksil ($-\text{OH}$) pada kisaran 3350 cm^{-1} dan gugus metilena ($-\text{CH}$) juga mengalami penurunan. Fenomena ini menunjukkan keterlibatan gugus polar dalam pembentukan ikatan hidrogen antarmolekul, yang turut memperkuat struktur polimer.

Penambahan Ca terbukti memengaruhi struktur jaringan melalui dua mekanisme utama, yaitu pembentukan ikatan ionik dengan gugus karboksilat dan pembentukan ikatan hidrogen antarrantai. Kedua mekanisme tersebut secara sinergis meningkatkan kestabilan struktural dan sifat fungsional dari film bioplastik yang dihasilkan.



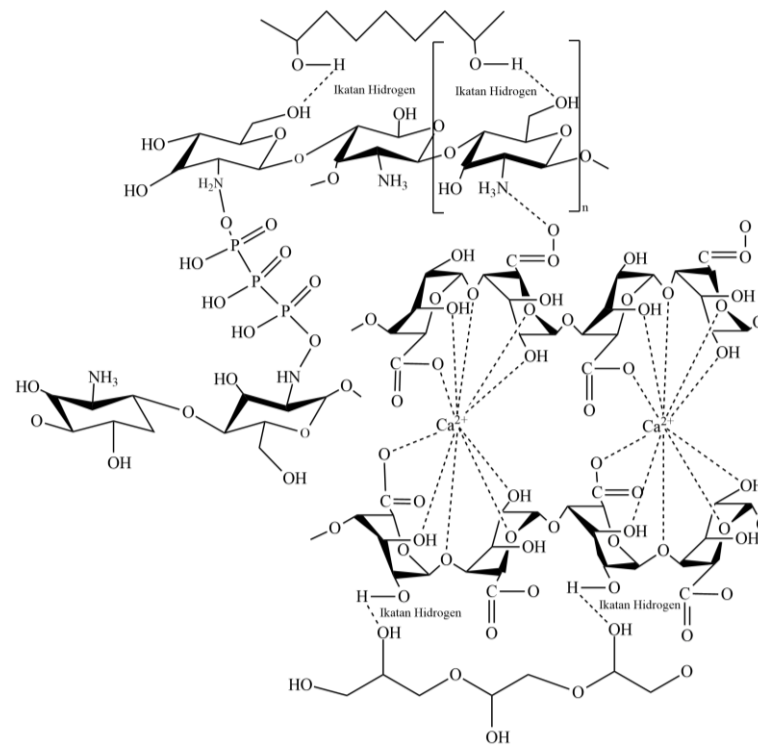
Gambar IV.4 Spektra FTIR Ca (0 mg - 10 mg)

Gambar IV.4 menyajikan spektrum FTIR dari film bioplastik dengan variasi konsentrasi kalsium asetat. Spektrum tersebut menunjukkan transisi bertahap dari dominasi pita serapan gugus -OH dan -COO⁻ pada formulasi tanpa kalsium (0 mg) menuju dominasi pita Ca-O pada formulasi dengan konsentrasi 7,5 mg dan 10 mg. Pita khas Ca-O tampak konsisten pada bilangan gelombang 904, 710, 692, dan 661 cm⁻¹, yang mengindikasikan terbentuknya ikatan koordinasi antara ion Ca²⁺ dan gugus karboksilat -COO⁻ dari natrium alginat melalui mekanisme jaringan ionik bertipe *egg-box*. Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian Liang dan Wu (2016), yang melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi kalsium menyebabkan intensifikasi pita Ca-O dan penurunan intensitas pita -OH dan -COO⁻, sebagai tanda keterlibatan gugus tersebut dalam pembentukan ikatan silang ionik.

Penurunan intensitas pita -CH dari gliserol juga diamati, yang mencerminkan terjadinya interaksi antarmolekul berupa ikatan hidrogen antara *plasticizer* dan rantai polimer. Interaksi ini mengurangi mobilitas rantai dan meningkatkan kerapatan struktur film. Hasil tersebut konsisten dengan laporan Otoni et al. (2023), yang menemukan bahwa penambahan gliserol menurunkan intensitas pita -CH dan menggeser pita -OH akibat pembentukan interaksi nonkovalen dalam matriks polisakarida.

Pita fosfat dari STPP tetap stabil pada bilangan gelombang 1033 cm^{-1} dan 916 cm^{-1} untuk seluruh variasi konsentrasi kalsium. Keberadaan pita yang tidak bergeser menunjukkan bahwa ikatan elektrostatik antara gugus amonium terprotonasi ($-\text{NH}_3^+$) dari kitosan dan gugus fosfat (PO_4^{3-}) dari STPP terbentuk tanpa mengubah posisi bilangan gelombang, meskipun terdapat perubahan lingkungan kimia lokal. Fenomena ini telah dijelaskan oleh Jorjani et al. (2022). Penurunan intensitas pita -OH dan -CH tanpa disertai pergeseran posisi puncak juga dilaporkan oleh Tarique et al. (2021), yang menyatakan bahwa *plasticizer* seperti gliserol cenderung menurunkan transmitansi melalui pembentukan ikatan hidrogen tanpa memengaruhi frekuensi vibrasi secara signifikan.

Interpretasi spektrum FTIR ini mendukung pemahaman terhadap mekanisme reaksi kimia yang dijelaskan secara skematis pada Gambar IV.5.



Gambar IV.5 Perkiraan Ikatan Kitosan/PVA-STPP/Na - Alg-Ca

Gambar IV.5 menggambarkan mekanisme pembentukan struktur film yang terdiri atas tiga tahap utama. Tahap pertama melibatkan pembentukan ikatan elektrostatik antara gugus amonium terprotonasi ($-\text{NH}_3^+$) pada posisi C-2 unit glukosamin dalam rantai kitosan dan gugus fosfat bermuatan negatif ($-\text{PO}_4^{3-}$) dari natrium tripolifosfat (STPP). Dalam lingkungan asam, kitosan mengalami protonasi, sedangkan STPP berperan sebagai polianion yang menghubungkan antar rantai kitosan. Interaksi elektrostatik tersebut membentuk jaringan polielektrolit menyerupai sistem jembatan silang (*bridging*), yang memperkuat ikatan awal antarrantai polimer dan meningkatkan kestabilan struktur film (Calvo dkk., 1997).

Tahap kedua mencakup pembentukan ikatan hidrogen antara gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dari poli(vinil alkohol) (PVA) dengan kitosan, serta antara gugus $-\text{OH}$ dan -

COO⁻ dari natrium alginat dengan gugus -NH₂ pada kitosan. Ikatan nonkovalen ini menjembatani interaksi antara lapisan pertama dan kedua, meningkatkan kohesi, homogenitas, serta fleksibilitas matriks polimer. Interaksi tambahan juga terbentuk antara gugus hidroksil gliserol dengan alginat, yang semakin memperkuat struktur antar lapisan melalui ikatan hidrogen.

Tahap ketiga melibatkan penguatan struktural melalui pembentukan jaringan ionik bertipe *egg-box* antara ion kalsium (Ca²⁺) dari kalsium asetat dan gugus karboksilat (-COO⁻) pada rantai alginat. Ikatan ini menghasilkan struktur tiga dimensi yang rapat dan meningkatkan integritas mekanik film. Keterlibatan gugus -OH dan -COO⁻ dalam proses ini ditunjukkan oleh penurunan intensitas puncak spektrum FTIR, yang mengindikasikan terbentuknya ikatan silang ionik.

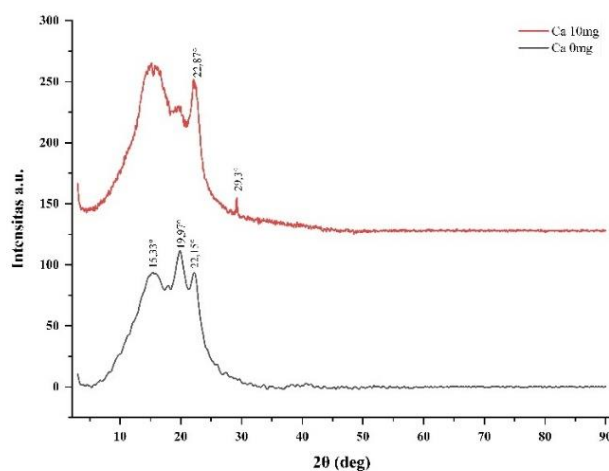
Gaya Van der Waals juga turut berkontribusi dalam memperkuat kestabilan film. Interaksi ini muncul akibat tarik-menarik antarmolekul netral atau antar segmen rantai polimer yang berdekatan, terutama pada bagian yang tidak terlibat langsung dalam pembentukan ikatan ionik maupun hidrogen. Meskipun bersifat lemah dan nonspektif, gaya ini berperan penting dalam menjaga kohesi fisik dan kerapatan lokal pada fase amorf polimer.

Hasil analisis tabel, grafik, dan ilustrasi mekanisme menunjukkan bahwa kombinasi berbagai jenis ikatan termasuk ikatan elektrostatik antara kitosan dan STPP, ikatan hidrogen antara PVA-kitosan, kitosan-alginat, serta gliserol-alginat, ikatan ionik antara Ca²⁺ dan gugus karboksilat pada alginat, dan *gaya Van der Waals* antar segmen netral secara sinergis membentuk jaringan polimer tiga dimensi yang stabil dan rapat. Penambahan Ca²⁺ terbukti meningkatkan densitas

ikatan silang dan mengurangi sifat hidrofilik film, sehingga memperbaiki ketahanan serta karakteristik mekanik film bioplastik. Temuan ini memperkuat potensi penggunaannya sebagai material kemasan aktif yang ramah lingkungan.

IV.2 Struktur Kristal Film (XRD) menggunakan XRD

Analisis difraksi sinar-X (XRD) dilakukan sebagai bagian dari karakterisasi struktural untuk mengevaluasi perubahan tingkat kristalinitas akibat penambahan kalsium (Ca) dalam sistem bioplastik berbasis kitosan, poli(vinil alkohol) (PVA), dan natrium alginat. Hasil pengamatan disajikan pada Gambar IV.6, yang menampilkan pola difraksi dari sampel dengan variasi konsentrasi Ca, serta Tabel IV.3, yang merangkum parameter kuantitatif seperti ukuran kristal (*crystallite size*) dan jarak antar bidang kristal (*d-spacing*), dihitung menggunakan Persamaan Scherrer.



Gambar IV.6 Pola XRD Bioplastik Tanpa Ca dan Menggunakan Ca

Sampel tanpa penambahan Ca (Ca 0 mg) menunjukkan puncak difraksi yang lebar pada sudut $2\theta \approx 19,97^\circ$ dan $22,15^\circ$, yang merepresentasikan struktur semi-kristalin rendah, sebagaimana lazim dijumpai pada sistem polimer tanpa ikatan silang ionik. Pola ini mengindikasikan bahwa keteraturan molekul belum terbentuk

secara signifikan, dan interaksi dominan masih berupa ikatan hidrogen antarmolekul. Temuan tersebut sejalan dengan laporan Qureshi et al. (2021), yang menyatakan bahwa film berbasis PVA-kitosan cenderung membentuk struktur amorf apabila tidak dikombinasikan dengan ion multivalen.

Sampel dengan penambahan kalsium 10 mg menunjukkan dua puncak tajam baru pada sudut $2\theta \approx 22,87^\circ$ dan $29,3^\circ$, yang diasosiasikan dengan bidang kristal (012) dan (104) dari struktur kalsit (CaCO_3). Kemunculan puncak-puncak tersebut menandakan terbentuknya ikatan ionik antara ion Ca^{2+} dan gugus $-\text{COO}^-$ pada alginat, $-\text{OH}$ pada PVA, serta $-\text{NH}_3^+$ pada kitosan, sehingga menciptakan keteraturan lokal dalam jaringan polimer. Russo et al. (2007) melaporkan bahwa penambahan ion Ca^{2+} pada film alginat meningkatkan intensitas puncak difraksi, yang mencerminkan terbentuknya domain semi-kristalin. Huang et al. (2020) menambahkan bahwa proses taut silang secara *in situ*, terutama dengan dukungan ion logam dan katalis asam, memperkuat kekuatan mekanik dan meningkatkan sifat hidrofobik melalui kerapatan struktur yang lebih tinggi. Model *egg-box* menjelaskan mekanisme pembentukan keteraturan ini, dengan Ca^{2+} berperan mengisi ruang antar rantai polimer dan menstabilkan jaringan melalui ikatan ionik. Zeng et al. (2024) menunjukkan bahwa sistem kitosan–alginat dengan ion Ca^{2+} membentuk struktur silang kompleks yang lebih stabil secara struktural.

Tabel IV.2 menunjukkan bahwa ukuran kristal meningkat dari 0,42 nm (Ca 0 mg) menjadi 0,45-0,46 nm (Ca 10 mg), disertai pelebaran nilai *d-spacing* dari 0,013–0,015 nm menjadi 0,015–0,019 nm. Perubahan ini mengindikasikan terjadinya relaksasi ikatan dan reorganisasi struktur polimer akibat masuknya ion

Ca^{2+} . Larobina dan Cipelletti (2013) menjelaskan bahwa ion divalen membentuk ikatan silang hierarkis dengan masa hidup bervariasi, menyebabkan ekspansi struktur dan peningkatan keteraturan molekul. Russo et al. (2007) dan Szekalska et al. (2021) juga melaporkan bahwa pembentukan jaringan silang ganda antara kitosan dan alginat oleh ion Ca^{2+} menghasilkan domain semi-kristalin dan struktur matriks yang lebih padat. Kulkarni et al. (2000) memperkuat temuan ini dengan menunjukkan bahwa peningkatan kristalinitas dalam sistem polimer larut air dapat dicapai melalui penambahan ion Ca^{2+} sebagai agen silang.

Gambar IV.6 dan Tabel IV.2 secara konsisten menunjukkan bahwa ion Ca^{2+} dari kalsium asetat berperan aktif tidak hanya sebagai pengisi ruang antar rantai, tetapi juga sebagai pengarah pembentukan keteraturan struktural dalam matriks film. Peran ini ditunjukkan oleh kemunculan puncak difraksi baru, peningkatan ukuran kristal, dan pelebaran *d-spacing*, yang bersama-sama mendukung terbentuknya struktur semi-kristalin yang lebih stabil. Pendekatan ini efektif dalam meningkatkan kestabilan molekul dan sifat mekanik film bioplastik pada skala nanoskopik.

Tabel IV.2 Perhitungan Jarak Antar Lapisan dan Ukuran Kristal

Jenis Membran	2θ	θ	θ (rad)	FWHM	β : $\pi/180 \times$ FWHM	Jarak antar lapisan (nm)	Ukuran kristal (nm)	Ukuran kristal (nm)
Ca 0 mg	15,33	7,665	0,13371	17,83	0,31103	0,010	0,44	0,42
	19,97	9,985	0,17418	18,83	0,32848	0,013	0,41	
	22,15	11,075	0,19320	18,83	0,32848	0,015	0,41	
Ca 10 mg	22,87	11,435	0,19948	16,83	0,29359	0,015	0,46	0,45
	29,3	14,65	0,25556	16,97	0,29603	0,019	0,45	

IV.3 Berat dan ketebalan

Peningkatan konsentrasi kalsium (Ca) dari 0 hingga 10 mg menghasilkan perubahan signifikan terhadap berat dan ketebalan film bioplastik, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel IV.3. Berat film meningkat dari 0,132 gram menjadi 0,257 gram, sedangkan ketebalan bertambah dari 0,051 mm menjadi 0,074 mm. Tren ini menunjukkan bahwa penambahan crosslinker Ca berkontribusi terhadap peningkatan jumlah massa terlarut dalam larutan pembentuk film, yang mencerminkan terbentuknya struktur matriks polimer yang lebih padat akibat interaksi antarkomponen seperti kitosan, PVA, alginat, dan gliserol.

Tabel IV.3 Data Berat Dan Ketebalan Film

Jenis Membran	Berat (g)	Ketebalan (mm)
Ca 0	0,132	0,051
Ca 2,5 mg	0,136	0,053
Ca 5 mg	0,150	0,058
Ca 7,5 mg	0,199	0,062
Ca 10 mg	0,257	0,074
Konvensional	0,062	0,025

Peningkatan ketebalan film secara linier berkorelasi dengan peningkatan konsentrasi ion kalsium (Ca^{2+}) dan dapat dijelaskan oleh terbentuknya ikatan silang antara ion Ca^{2+} dan gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) dari natrium alginat, serta interaksi dengan gugus fosfat dari *Sodium Tripolifosfat* (STPP). Reaksi ini menghasilkan struktur tiga dimensi yang rapat melalui mekanisme *egg-box*, di mana ion Ca^{2+} berkoordinasi dengan blok α -L-guluronat pada rantai alginat untuk membentuk zona sambungan yang stabil (Grant dkk., 1973; Draget dkk., 2006). Ikatan tambahan berupa interaksi hidrogen antara gugus $-\text{OH}$ dari PVA dan ikatan

elektrostatik antara gugus -NH_3^+ dari kitosan turut memperkuat jaringan antarmolekul, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan ketebalan film.

Penelitian Eslami et al. (2023) mendukung temuan ini dengan menunjukkan bahwa peningkatan kandungan padatan dalam larutan polimer, serta kehadiran *plasticizer* seperti gliserol, berkontribusi dalam menambah berat dan ketebalan film. Gliserol, yang bersifat hidrofilik, mampu memperluas jarak antar rantai polimer dan meningkatkan retensi air dalam matriks, sehingga volume dan ketebalan film meningkat secara keseluruhan.

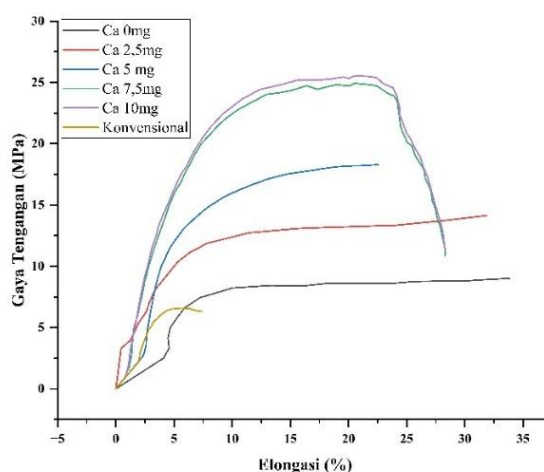
Ketebalan film merupakan parameter penting dalam evaluasi performa kemasan bioplastik, karena berpengaruh terhadap kekuatan mekanik dan kemampuan sebagai penghalang uap air. Berdasarkan ketentuan Japanese Industrial Standard (JIS K 6301), batas maksimum ketebalan film bioplastik adalah $< 0,25$ mm. Nilai ketebalan maksimum yang diperoleh dalam penelitian ini, yaitu $0,074$ mm, masih berada dalam rentang yang diizinkan. Formulasi film bioplastik yang dikembangkan dapat disimpulkan telah memenuhi kriteria kelayakan dimensi untuk aplikasi sebagai kemasan ramah lingkungan.

IV.4 Kuat Tarik Film

Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan maksimum (tensile strength) dan daya regang (*elongation*) film bioplastik. Kedua parameter tersebut menjadi indikator utama dalam menilai kelayakan film sebagai bahan kemasan ramah lingkungan yang mampu bersaing dengan plastik konvensional. Nilai kuat tarik dan elongasi tercantum pada Tabel IV.4, sedangkan hubungan grafik antara kedua parameter tersebut ditampilkan pada Gambar IV.7.

Tabel IV.4 Nilai Kuat Tarik dan Elongasi Film

Jenis Membran	Kuat Tarik (MPa)	Elongasi (%)
Ca 0 mg	9,00	33,80
Ca 2,5 mg	14,06	31,00
Ca 5 mg	18,28	21,52
Ca 7,5 mg	24,74	20,74
Ca 10 mg	25,34	20,60
Konvensional	6,37	7,50

**Gambar IV. 7** Grafik Hubungan Elongasi dan Kuat Tarik

Gambar IV.7 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi kalsium (Ca) secara langsung memengaruhi peningkatan *tensile strength* dan *elongation* film. Film konvensional menunjukkan performa mekanik terendah, dengan nilai *tensile strength* sebesar 6,37 MPa dan *elongation* sebesar 7,50%, masih berada di bawah rentang plastik industri yang umumnya berkisar antara 8–20 MPa (Brandrup dkk., 2004).

Film bioplastik tanpa penambahan Ca (0 mg) menunjukkan *tensile strength* sebesar 9 MPa dan *elongation* sebesar 33,80%. Nilai tersebut mencerminkan peran gugus polar aktif seperti -OH, -NH₂, dan -COO⁻ dari kitosan, PVA, dan natrium alginat. Interaksi antarmolekul melalui ikatan hidrogen dan gaya tarik elektrostatik menghasilkan jaringan polimer padat meskipun belum terjadi ikatan silang ionik.

Penambahan 2,5 mg Ca meningkatkan *tensile strength* menjadi 14,06 MPa, namun *elongation* menurun menjadi 31%. Kalsium berperan dalam membentuk ikatan silang ionik antara ion Ca^{2+} dan gugus $-\text{COO}^-$ pada rantai alginat, membentuk struktur khas *egg-box*. Interaksi ini meningkatkan kepadatan dan kestabilan jaringan, namun membatasi mobilitas rantai, sehingga elastisitas sedikit menurun (Aderibigbe & Buyana, 2018; Szymańska & Winnicka, 2015; Łabowska dkk., 2019).

Penambahan Ca hingga 5 mg menghasilkan peningkatan *tensile strength* menjadi 18,28 MPa dan *elongation* sebesar 21,52%. Kenaikan ini menunjukkan terbentuknya distribusi ikatan silang yang lebih merata dalam struktur semi-kristalin. Menurut Van Rooyen et al. (2023), densitas ikatan silang yang tersebar merata dapat memperkuat film tanpa mengorbankan elastisitas, selama konsentrasi ion berada dalam batas optimal. Temuan serupa dikemukakan oleh Shtein et al. (2016), yang menunjukkan bahwa kendali terhadap jumlah ion kalsium penting untuk menghindari penurunan fleksibilitas.

Formulasi optimal diperoleh pada konsentrasi Ca sebesar 7,5 mg, dengan *tensile strength* mencapai 24,74 MPa dan *elongation* sebesar 20,74%. Kondisi ini mengindikasikan terbentuknya ikatan silang ionik maksimum dan jaringan polimer yang stabil serta lentur. Moustafa et al. (2022) menyebutkan bahwa kerapatan morfologi internal akibat ikatan silang ionik berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik film.

Penambahan Ca hingga 10 mg meningkatkan *tensile strength* menjadi 25,34 MPa, namun nilai *elongation* menurun menjadi 20,60%. Penurunan ini

menunjukkan terjadinya *hyper-crosslinking*, yaitu kondisi ketika kelebihan ion Ca^{2+} menghambat pergerakan rantai polimer dan menyebabkan kekakuan (Szekalska dkk., 2016). Berdasarkan SNI 19-0414-1989, dengan batas minimum *tensile strength* sebesar 24,7 MPa dan *elongation* antara 21–220%, formulasi dengan 7,5 mg dan 10 mg Ca telah memenuhi syarat kekuatan tarik, sedangkan semua sampel masih memenuhi kriteria elongasi.

Formulasi film bioplastik berbasis kitosan, PVA, dan natrium alginat yang dimodifikasi dengan Ca terbukti memiliki sifat mekanik unggul. Kombinasi kekuatan tarik tinggi dan elongasi moderat menjadikannya sangat layak dikembangkan sebagai alternatif kemasan aktif yang ramah lingkungan.

IV.5 Hidrofilisitas Film

Evaluasi sifat permukaan film bioplastik dilakukan melalui analisis sudut kontak untuk menentukan tingkat hidrofilisitas atau hidrofobisitas. Nilai sudut kontak mencerminkan interaksi antara tetesan air dan permukaan film; semakin kecil sudut kontak, semakin hidrofilik permukaan, sedangkan sudut kontak yang besar menunjukkan karakter hidrofobik. Data pengukuran sudut kontak dari masing-masing formulasi disajikan pada Tabel IV.5.

Tabel IV.5 Nilai sudut kontak berbagai jenis film

Jenis Membran	Sudut Kiri (°)	Sudut Kanan (°)	Rata - rata (°)	Hasil (°)
Ca 0 mg	80,6	82,5	81,55	98,45
Ca 2,5 mg	82,9	83,7	83,3	96,7
Ca 5 mg	93,5	91,2	92,35	87,65
Ca 7,5 mg	105,0	90,5	97,75	82,25
Ca 10 mg	104,07	102,5	103,285	76,715
Konvensional	119,0	123,0	121	59

Formulasi film dengan 0 mg kalsium menunjukkan sudut kontak terendah sebesar $81,55^\circ$, yang mencerminkan karakter paling hidrofilik. Ketidakhadiran ion Ca^{2+} memungkinkan gugus polar seperti $-\text{OH}$, $-\text{COO}^-$, dan $-\text{NH}_2$ tetap aktif di permukaan dan mudah berinteraksi dengan air. Peningkatan konsentrasi Ca menjadi 2,5 mg dan 5 mg menyebabkan kenaikan sudut kontak menjadi $83,30^\circ$ dan $92,35^\circ$, mengindikasikan berkurangnya hidrofilisitas permukaan. Fenomena ini disebabkan oleh terbentuknya ikatan silang ionik antara Ca^{2+} dan gugus $-\text{COO}^-$ dari alginat melalui mekanisme *egg-box*, yang menarik gugus polar ke dalam jaringan internal dan mengurangi interaksinya dengan air (Grant dkk., 1973; Zhang dkk., 2020).

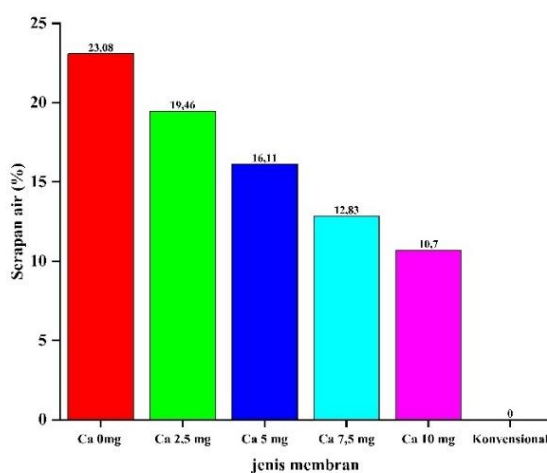
Penambahan Ca sebesar 7,5 mg dan 10 mg menghasilkan sudut kontak masing-masing $97,75^\circ$ dan $103,29^\circ$, menunjukkan peningkatan karakter hidrofobik secara signifikan. Ikatan silang ionik antara Ca^{2+} dengan gugus karboksilat dan hidroksil dari alginat dan PVA menghasilkan struktur jaringan yang lebih rapat, sehingga menurunkan ketersediaan gugus polar pada permukaan. STPP yang terdapat dalam semua formulasi (kecuali film konvensional) membentuk ikatan elektrostatik dengan gugus $-\text{NH}_3^+$ pada kitosan, namun pengaruhnya terhadap hidrofobisitas lebih kecil dibanding Ca^{2+} . Film konvensional mencatat sudut kontak tertinggi sebesar 121° , yang mencerminkan permukaan sangat hidrofobik akibat ketiadaan gugus polar aktif yang mampu membentuk ikatan hidrogen (Korumilli dkk., 2024; Yao dkk., 2022).

Peningkatan konsentrasi Ca memberikan dampak nyata terhadap penurunan hidrofilisitas permukaan film. Interaksi ionik menyebabkan gugus polar tertarik ke bagian dalam struktur polimer, sehingga menurunkan afinitas terhadap air.

Meskipun STPP juga memperkuat jaringan film, efek pengurangannya terhadap sifat hidrofilik tidak sebesar pengaruh dari Ca^{2+} . Penyesuaian formulasi dan konsentrasi zat aktif menjadi kunci dalam mencapai karakter permukaan yang sesuai untuk kebutuhan aplikasi kemasan ramah lingkungan.

IV.6 Uji Serapan Uap Air

Penilaian kemampuan serapan air dilakukan untuk mengukur seberapa besar kapasitas film bioplastik dalam menyerap air setelah perendaman selama 24 jam. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi ketahanan terhadap air serta kerapatan jaringan polimer pada formulasi berbasis kitosan, poli(vinil alkohol) (PVA), dan natrium alginat yang dimodifikasi dengan agen pengikat silang. Nilai serapan air yang tinggi mengindikasikan struktur longgar dengan karakter hidrofilik, sedangkan nilai rendah mencerminkan jaringan padat dan lebih tahan terhadap penetrasi molekul air. Hasil pengujian disajikan pada Gambar IV.8.



Gambar IV.8 Presentase Serapan Air Film

Tren penurunan nilai serapan air tampak jelas seiring peningkatan konsentrasi kalsium asetat (Ca) dalam film. Formulasi tanpa penambahan Ca mencatat nilai tertinggi sebesar 23,08%, sedangkan penambahan 10 mg Ca menurunkan nilai

tersebut menjadi 10,70%. Formulasi dengan Ca sebesar 2,5 mg, 5 mg, dan 7,5 mg masing-masing mencatat nilai serapan sebesar 19,46%, 16,11%, dan 12,83%. Film konvensional menunjukkan serapan 0%, menandakan sifat sangat hidrofobik karena tidak memiliki gugus polar aktif yang mampu berinteraksi dengan air.

Nilai serapan tertinggi pada formulasi tanpa Ca berkaitan dengan belum terbentuknya ikatan silang ionik dalam jaringan polimer. Gugus hidrofilik seperti $-OH$ dari PVA dan $-NH_2$ dari kitosan tetap tersedia di permukaan dan berkontribusi pada tingginya afinitas terhadap air. Temuan ini sejalan dengan laporan Jain et al. (2017), yang menyebutkan bahwa ketiadaan *crosslinker* menyebabkan film berbasis PVA dan kitosan memiliki struktur longgar dan kapasitas serapan tinggi.

Efektivitas ion Ca^{2+} dalam membentuk ikatan silang ionik dengan gugus $-COO^-$ dari alginat melalui mekanisme *egg-box* berkontribusi signifikan terhadap penurunan serapan air. Struktur jaringan menjadi lebih padat dan rapat, sehingga menghambat difusi air ke dalam matriks film (Jost & Reinelt, 2016). Selain Ca^{2+} , keberadaan STPP juga memperkuat jaringan melalui ikatan elektrostatik dengan gugus amina dari kitosan. Studi oleh Jonassen et al. (2012) dan Zhao et al. (2019) menunjukkan bahwa sistem kitosan-STPP lebih stabil secara dimensi dan lebih tahan terhadap degradasi di lingkungan basah.

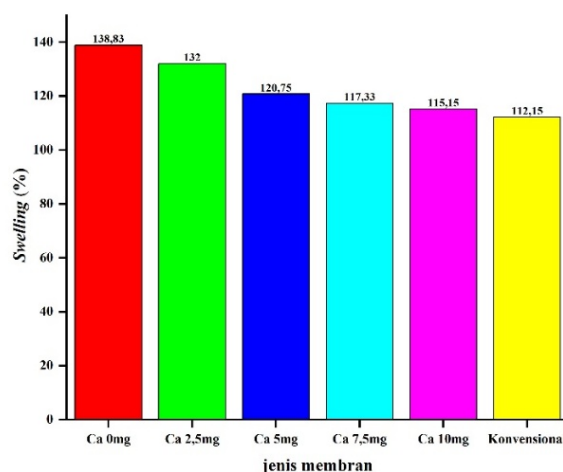
Peran gliserol sebagai *plasticizer* ditujukan untuk meningkatkan fleksibilitas, namun sifat hidrofiliknya dapat meningkatkan serapan air. Efek ini berhasil diminimalkan oleh jaringan silang padat yang terbentuk akibat kombinasi Ca^{2+} dan STPP. Formulasi dengan Ca sebesar 7,5 mg dan 10 mg berhasil menunjukkan nilai

serapan rendah meskipun mengandung gliserol, sejalan dengan hasil yang dilaporkan oleh Tarique et al. (2021).

Formulasi dengan penambahan Ca memberikan performa optimal dalam menurunkan serapan air. Formulasi tersebut memenuhi batas maksimum 21% yang ditetapkan oleh SNI 7188.7:2016, sehingga layak dikembangkan sebagai bahan kemasan bioplastik yang stabil terhadap kelembapan tinggi.

IV.7 Pengembangan (*Swelling*) Film

Kemampuan film bioplastik dalam menyerap air dievaluasi melalui uji *Swelling*, yang merefleksikan struktur jaringan internal serta sifat hidrofilik dari film. Gambar IV.9 memperlihatkan bahwa peningkatan konsentrasi kalsium asetat (Ca) dari 0 mg hingga 10 mg menghasilkan tren penurunan nilai *Swelling* secara konsisten. Pola ini menegaskan peran signifikan ion Ca^{2+} dalam pembentukan ikatan silang antar rantai polimer, sesuai dengan tujuan utama penelitian untuk meningkatkan ketahanan air melalui pendekatan ionik-*crosslinking*.



Gambar IV.9 Presentase Pengembangan (*Swelling*) Film

Formulasi tanpa penambahan Ca (0 mg) mencatat nilai *Swelling* tertinggi sebesar 138,83%. Nilai ini menunjukkan struktur polimer yang masih longgar

dengan banyaknya gugus hidrofilik, seperti hidroksil (-OH) dari PVA dan amina (-NH₂) dari kitosan, yang memiliki kecenderungan tinggi dalam membentuk ikatan hidrogen dengan air (Zhang dkk., 2022). Ketika Ca ditambahkan sebesar 2,5 mg, nilai *Swelling* menurun menjadi 132,19%, menandakan mulai terbentuknya interaksi ionik awal antara Ca²⁺ dan gugus karboksilat (-COO⁻) dari rantai alginat.

Peningkatan konsentrasi Ca hingga 5 mg dan 7,5 mg semakin menurunkan nilai *Swelling* menjadi 127,84% dan 120,88%. Penurunan ini dikaitkan dengan pembentukan struktur *egg-box*, yaitu konfigurasi ikatan silang tiga dimensi antara ion Ca²⁺ dan blok guluronat pada alginat. Struktur tersebut memperkecil jarak antar rantai dan menghambat difusi air ke dalam film. Pada konsentrasi 10 mg, nilai *Swelling* mencapai titik terendah sebesar 115,15%, yang mencerminkan kondisi jenuh ikatan silang serta pembentukan jaringan polimer yang rapat dan kurang permeabel terhadap air.

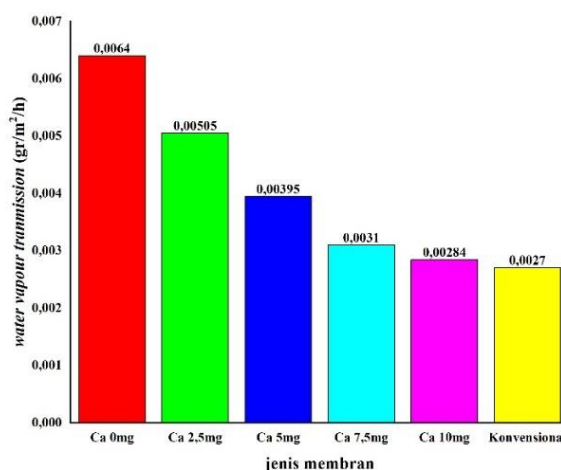
Selain ion Ca²⁺, keberadaan STPP turut memperkuat jaringan polimer melalui pembentukan ikatan silang ionik dengan gugus amina dari kitosan, yang juga berkontribusi dalam menurunkan nilai *Swelling* (Yusefi dkk., 2021). Di sisi lain, gliserol berperan menjaga fleksibilitas film sebagai *plasticizer*, namun tidak memengaruhi nilai *Swelling* secara signifikan karena konsentrasinya dikontrol konstan pada semua formulasi.

Formulasi kontrol yang tidak mengandung Ca, STPP, maupun gliserol menunjukkan nilai *Swelling* sebesar 112,15%. Nilai ini lebih rendah dari semua formulasi utama karena tidak adanya komponen pengikat atau *plasticizer*, sehingga film yang dihasilkan tidak memiliki jaringan polimer permanen meskipun lebih

stabil secara dimensi. Seluruh nilai *Swelling* yang diperoleh masih melampaui batas yaitu 99% sesuai SNI 7188.7:2016. Formulasi dengan penambahan Ca, khususnya pada konsentrasi tinggi, terbukti paling efektif dalam mengendalikan daya serap air, menjadikannya kandidat unggul untuk aplikasi kemasan bioplastik tahan kelembapan.

IV.8 Water Vapour Transmission Rate (WVTR) Film

Uji *Water Vapour Transmission Rate* (WVTR) digunakan untuk menilai kemampuan film bioplastik dalam menghambat laju difusi uap air yang melewati permukaannya. Pengukuran ini memberikan informasi penting mengenai ketahanan film terhadap kelembaban, serta mencerminkan tingkat kerapatan dan keseragaman struktur matriks polimer. Nilai WVTR yang rendah mengindikasikan performa penghalang uap air yang baik, sehingga film lebih cocok digunakan sebagai bahan pengemas untuk produk yang sensitif terhadap kelembapan. Hasil pengujian WVTR untuk berbagai formulasi film bioplastik ditampilkan pada Gambar IV.10.



Gambar IV.10 Data *Water Vapour Transmission Rate* (WVTR) Film

Nilai *Water Vapour Transmission Rate* (WVTR) yang tinggi mengindikasikan struktur jaringan polimer yang longgar dan bersifat sangat

hidrofilik, memungkinkan molekul uap air berdifusi dengan mudah melalui permukaan film. Sebaliknya, nilai WVTR yang rendah mencerminkan struktur yang lebih padat dan kristalin, sehingga lebih tahan terhadap penetrasi uap air. Gambar IV.9 memperlihatkan tren penurunan WVTR secara bertahap pada berbagai formulasi film bioplastik dengan peningkatan konsentrasi kalsium asetat (Ca). Formulasi tanpa penambahan Ca (0 mg) menunjukkan nilai WVTR tertinggi sebesar 0,0064 g/m²/jam, yang mencerminkan struktur terbuka dan dominasi gugus fungsional polar seperti hidroksil (-OH), amina (-NH₂), dan karboksilat (-COO⁻). Ketidakhadiran ikatan silang menyebabkan terbentuknya jalur difusi uap air yang luas, sebagaimana dijelaskan oleh Olivas et al. (2008) dalam kajian mereka terhadap film alginat tanpa *crosslinking*.

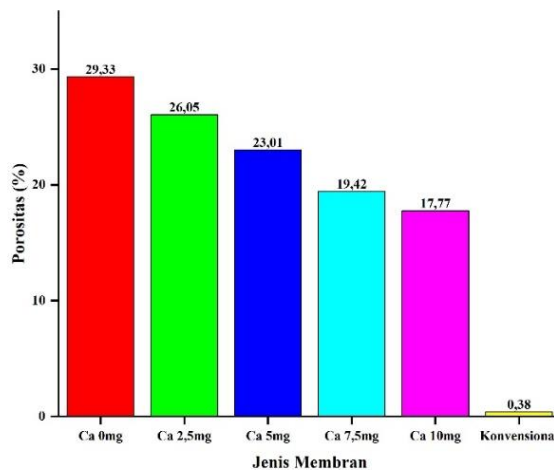
Peningkatan konsentrasi Ca hingga 10 mg menghasilkan penurunan WVTR yang signifikan, mencapai nilai terendah sebesar 0,00284 g/m²/jam. Penurunan ini menunjukkan keberhasilan ion Ca²⁺ dalam membentuk ikatan silang ionik dengan gugus -COO⁻ pada rantai alginat, membentuk struktur tiga dimensi rapat melalui mekanisme *egg-box* yang menghambat mobilitas uap air. Keberadaan *Sodium Tripolyphosphate* (STPP) turut memperkuat jaringan film melalui pembentukan ikatan elektrostatik antara gugus polifosfat dan gugus -NH₃⁺ pada kitosan. Kombinasi ikatan silang kationik (Ca²⁺) dan anionik (STPP) menghasilkan struktur yang lebih padat dan stabil, sehingga mempersempit jalur difusi dan meningkatkan ketahanan terhadap kelembaban (Liu dkk., 2022; Hu dkk., 2018; Li dkk., 2024).

Nilai WVTR film dengan penambahan Ca mampu mendekati atau melampaui ambang batas maksimum berdasarkan standar JIS Z 1707, yakni 0,288 g/m²/jam

(setara 6,91 g/m²/24 jam) (Müller dkk., 2012). Capaian ini menunjukkan bahwa film bioplastik yang dikembangkan memiliki potensi tinggi sebagai penghalang kelembaban, dan layak diterapkan dalam kemasan fungsional berbasis biopolimer yang memerlukan proteksi terhadap difusi uap air.

IV.9 Porositas Film

Porositas merupakan parameter penting yang mencerminkan struktur mikro dan kerapatan jaringan film bioplastik. Nilai ini menunjukkan proporsi rongga atau ruang kosong antar rantai polimer yang terbentuk selama proses pengeringan, serta memengaruhi sifat fungsional film seperti daya serap air, permeabilitas uap, kekuatan mekanik, dan kemampuan sebagai penghalang kelembapan. Data hasil pengujian porositas ditampilkan pada Gambar IV.11.



Gambar IV.11 Presentase Porositas Film

Formulasi tanpa penambahan kalsium asetat (Ca 0 mg) menunjukkan nilai porositas tertinggi sebesar 29,33%. Kondisi ini menggambarkan struktur film yang longgar akibat belum terbentuknya ikatan silang ionik. Interaksi antarmolekul masih terbatas pada ikatan hidrogen dan gaya *Van der Waals* antara gugus hidroksil dari PVA, amina dari kitosan, dan karboksilat dari alginat. Ketidadaan jembatan

ionik menyebabkan jaringan polimer yang terbentuk bersifat kurang stabil dan berpori tinggi.

Peningkatan konsentrasi Ca secara bertahap menurunkan nilai porositas menjadi 26,05% (2,5 mg), 23,01% (5 mg), 19,42% (7,5 mg), dan 17,77% (10 mg). Penurunan ini menunjukkan terbentuknya ikatan silang ionik antara Ca^{2+} dan gugus karboksilat pada rantai alginat, menghasilkan struktur tiga dimensi yang rapat melalui mekanisme *egg-box*. Roquero et al. (2021) melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi Ca^{2+} menyebabkan densifikasi struktur film dan penutupan pori-pori besar. Grant et al. (1973) juga menunjukkan bahwa Ca^{2+} berinteraksi secara spesifik dengan blok guluronat, membentuk ikatan silang hierarkis yang memperkuat jaringan dan mengurangi porositas.

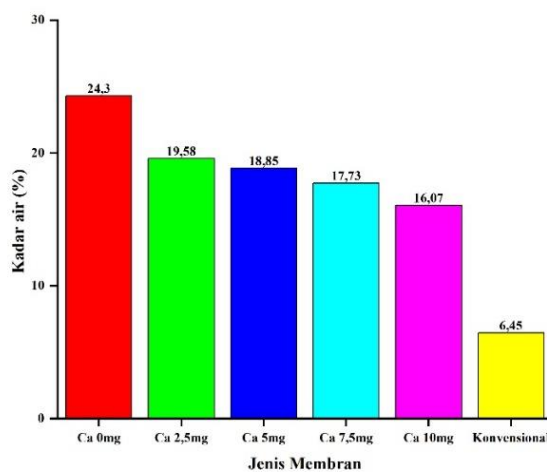
Keberadaan STPP sebagai *crosslinker* anionik turut memperkuat jaringan melalui pembentukan ikatan elektrostatik antara gugus $-\text{NH}_3^+$ kitosan dan gugus fosfat dari STPP. Interaksi ini menghasilkan jaringan polielektrolit yang lebih rapat dan stabil. Bouzid Rekik et al. (2023) menunjukkan bahwa *crosslinking* kitosan dengan STPP meningkatkan kekuatan mekanik dan menurunkan porositas serta permeabilitas air.

Gliserol, sebagai *plasticizer*, berkontribusi dalam menjaga fleksibilitas film tetapi juga berpotensi meningkatkan porositas. Sifat hidrofilik dan gugus $-\text{OH}$ pada gliserol dapat menarik air dan menciptakan celah antar rantai polimer. Huang et al. (2020) melaporkan bahwa peningkatan gliserol dalam film kitosan-PVA meningkatkan porositas dan permeabilitas uap secara signifikan.

Plastik konvensional dalam penelitian ini memiliki nilai porositas yang sangat rendah, yaitu 0,38%, mencerminkan kepadatan tinggi dari material berbasis petrokimia yang tidak memiliki jaringan kimia terbuka seperti biopolimer. Komposisi dan mekanisme pengikatan kimia menjadi faktor krusial dalam pengendalian porositas. Penambahan Ca dan STPP terbukti menurunkan porositas melalui pembentukan jaringan silang, sementara kelebihan gliserol cenderung meningkatkan porositas. Kombinasi yang tepat diperlukan untuk menghasilkan film dengan struktur padat dan kinerja optimal.

IV.10 Kadar Air Fim

Kadar air merupakan parameter penting yang mencerminkan sifat hidrofilik dan kapasitas retensi kelembapan dari film bioplastik. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan air dan stabilitas dimensi dari film yang diformulasikan dengan berbagai konsentrasi kalsium asetat (Ca). Evaluasi ini menjadi sangat relevan dalam konteks aplikasi pengemasan produk yang sensitif terhadap kelembapan, karena kadar air yang tinggi dapat meningkatkan permeabilitas uap dan menurunkan kekuatan mekanik film. Oleh karena itu, strategi penurunan kadar air menjadi penting dalam perancangan kemasan yang fungsional (Arrieta dkk., 2014). Hasil pengujian kadar air ditampilkan pada Gambar IV.12.



Gambar IV.12 Presentase Kadar Air Film

Film tanpa penambahan Ca (0 mg) menunjukkan kadar air tertinggi sebesar 24,3%, yang mencerminkan struktur polimer yang sangat hidrofilik dengan dominasi gugus hidroksil dari PVA dan gugus amina dari kitosan. Peningkatan konsentrasi Ca menyebabkan penurunan kadar air secara bertahap menjadi 19,58% (2,5 mg), 18,85% (5 mg), 17,73% (7,5 mg), hingga 16,07% (10 mg). Penurunan ini terjadi akibat pembentukan ikatan silang ionik antara ion Ca^{2+} dan gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) pada rantai alginat, menghasilkan struktur tiga dimensi tipe *egg-box* yang padat dan tahan air (Su dkk., 2025). Interaksi ion Ca^{2+} dengan gugus hidroksil dan amina juga menurunkan jumlah situs aktif hidrofilik, sehingga mengurangi kemampuan film dalam mempertahankan kelembapan (Nugraheni dkk., 2018).

Nilai kadar air mulai mencapai plateau di atas konsentrasi 5 mg Ca, mengindikasikan terbatasnya jumlah situs aktif yang tersedia untuk pembentukan ikatan silang tambahan. Fenomena ini juga diamati oleh Su et al. (2025) dalam penelitian terhadap sistem hidrogel berbasis Ca^{2+} , yang menunjukkan bahwa efisiensi pengikatan ionik mengalami kejenuhan pada dosis tertentu.

Plastik konvensional memang menunjukkan daya tahan tinggi terhadap penetrasi uap air, tetapi tidak memiliki sifat *biodegradabel* sehingga menimbulkan permasalahan lingkungan yang signifikan akibat akumulasi limbah (Singh dkk., 2024). Formulasi bioplastik dengan penambahan 10 mg Ca menunjukkan kadar air terendah sebesar 16,07%, menandakan peningkatan ketahanan terhadap kelembapan sekaligus mempertahankan sifat biodegradabilitas. Pendekatan formulasi ini mampu menggabungkan ketahanan fungsional dan aspek keberlanjutan, sehingga menjadikannya kandidat yang menjanjikan untuk pengemasan ramah lingkungan.

IV.11 Biodegradabilitas Film

Degradasi film bioplastik dievaluasi untuk menilai kemampuan peluruhan material dalam lingkungan alami. Pengujian dilakukan menggunakan metode penguburan tanah dalam kondisi terang guna mensimulasikan kombinasi paparan sinar matahari, kelembapan, dan aktivitas mikroorganisme tanah. Tiga proses utama berperan dalam disintegrasi film, yakni fotodegradasi akibat radiasi ultraviolet, hidrolisis oleh air tanah, serta biodegradasi yang dipicu aktivitas mikroorganisme. Penilaian biodegradasi didasarkan pada waktu hilangnya film secara visual sesuai standar ASTM D5988 dan ISO 17088:2021, yang menyatakan bahwa material dikategorikan sebagai *biodegradable* apabila terurai secara signifikan dalam waktu kurang dari 180 hari di tanah aktif mikrobiologis. Hasil uji biodegradasi tercantum pada Tabel IV.6.

Tabel IV.6 Waktu Biodegradabilitas Film

Jenis Membran	Waktu Degradasi (hari)
Ca 0mg	40
Ca 2,5mg	47
Ca 5mg	52
Ca 7,5mg	56
Ca 10mg	64

Formulasi tanpa penambahan kalsium asetat (Ca 0 mg) mengalami degradasi tercepat dalam waktu 40 hari. Penambahan Ca sebesar 2,5; 5; 7,5; dan 10 mg secara bertahap memperpanjang waktu degradasi menjadi masing-masing 47, 52, 56, dan 64 hari. Seluruh formulasi tetap memenuhi kriteria *biodegradable* karena berada di bawah batas 180 hari. Perpanjangan waktu ini menunjukkan bahwa penambahan Ca memperkuat struktur film dan mengatur laju degradasi menjadi lebih stabil, bukan menghambat proses peluruhan.

Struktur kimia matriks film sangat menentukan laju degradasi. Formulasi tanpa Ca hanya mengandalkan ikatan hidrogen antar gugus -OH (PVA), -NH₂ (kitosan), dan -COO⁻ (alginat), yang lemah dan mudah terurai oleh UV, air, serta enzim tanah. Gliserol sebagai *plasticizer* memperbesar jarak antarrantai dan porositas, mempercepat penetrasi degradasi (Huang dkk., 2020). Sementara itu, penambahan STPP membentuk ikatan elektrostatik antara -NH₃⁺ dan -PO₄³⁻, menghasilkan jaringan polielektrolit yang stabil melalui mekanisme *ionotropic gelation* (Budi dkk., 2020). Meski memperkuat struktur, degradasi tetap terjadi karena kitosan mudah terurai secara enzimatik.

Peran kalsium menjadi lebih signifikan dalam membentuk struktur film yang lebih rapat. Ion Ca²⁺ berikatan dengan gugus -COO⁻ pada alginat membentuk struktur semi-kristalin melalui mekanisme *egg-box*, yang meningkatkan kerapatan

dan menghambat difusi air, cahaya UV, serta kolonisasi mikroorganisme (Saswat & Maheshwari, 2022). Struktur ini memperlambat proses disintegrasi, tetapi tetap dapat terurai secara biologis karena ikatan ionik bersifat tidak permanen di lingkungan tanah (Zinina dkk., 2023).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua formulasi, termasuk film dengan konsentrasi Ca tertinggi (10 mg), yang terdegradasi dalam 64 hari, masih tergolong *biodegradable*. Dengan demikian, modifikasi struktur film melalui penambahan Ca dan STPP terbukti efektif memperkuat ketahanan tanpa menghilangkan kemampuan degradasi lingkungan, menjadikannya kandidat yang sesuai untuk aplikasi kemasan ramah lingkungan sekali pakai.

IV.12 Aplikasi Film Bioplastik terhadap Daya Simpan Tomat

Evaluasi efektivitas film bioplastik dalam menjaga mutu fisik tomat selama penyimpanan dilakukan melalui pengamatan visual terhadap perubahan yang terjadi pada buah segar yang dikemas menggunakan berbagai formulasi film. Pengujian ini bertujuan menilai kemampuan film dalam memperpanjang masa simpan pada suhu ruang berdasarkan indikator visual, seperti perubahan warna kulit, tingkat kekencangan, dan munculnya tanda-tanda pembusukan. Hasil dokumentasi selama penyimpanan hingga hari ke-49 ditampilkan pada Gambar IV.13.

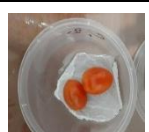
Formulasi film diaplikasikan langsung pada permukaan tomat segar untuk menilai kemampuannya dalam menekan laju respirasi dan mengurangi kehilangan air. Tomat tanpa pelapisan film (kontrol) menunjukkan tanda pembusukan pertama pada hari ke-7. Formulasi tanpa penambahan kalsium (Ca 0 mg) memperpanjang

masa simpan hingga hari ke-21, meskipun efektivitasnya terbatas akibat belum terbentuknya ikatan silang ionik secara signifikan.

Kinerja pelindung film meningkat secara bertahap seiring penambahan kalsium asetat sebesar 2,5 mg dan 5 mg, yang mampu mempertahankan kondisi tomat hingga hari ke-28 dan ke-35. Peningkatan ini menunjukkan kontribusi ion Ca^{2+} dalam membentuk ikatan silang antara gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$) dari natrium alginat dan gugus fosfat dari STPP, membangun struktur film yang lebih rapat dan tahan air. Senturk Parreidt et al. (2018) menjelaskan bahwa struktur *egg-box* yang terbentuk akibat koordinasi ion Ca^{2+} pada matriks alginat dapat meningkatkan kekuatan mekanik dan menurunkan permeabilitas film terhadap uap air serta gas.

Formulasi dengan penambahan Ca secara bertahap mampu mempertahankan, buah tomat tetap segar tanpa pembusukan hingga hari ke-49. Hal ini menandakan bahwa jaringan silang yang terbentuk bersifat lebih homogen dan stabil, efektif dalam memperlambat laju respirasi dan pembusukan.

Peran gliserol sebagai *plasticizer* turut mendukung fleksibilitas dan adhesi film pada permukaan buah. Bezerra et al. (2024) menyatakan bahwa kombinasi gliserol dan alginat meningkatkan kelenturan serta sifat penghalang air film. Penelitian Sabeva et al. (2025) juga membuktikan bahwa penambahan ion Ca^{2+} dalam sistem film kitosan–alginat efektif mengurangi kehilangan air dan menjaga tekstur buah. Oleh karena itu, keberadaan Ca^{2+} tidak hanya memperkuat struktur fisik film melalui ikatan silang, tetapi juga menurunkan laju difusi gas pembusuk, seperti amonia dan karbon dioksida, selama proses penyimpanan.

Jenis film	Hari ke - 1	Hari ke - 7	Hari ke -14	Hari ke - 21	Hari ke - 28	Hari ke 35	Hari ke- 42	Hari ke - 49
Kontrol								
Ca 0 mg								
Ca 2,5 mg								
Ca 5 mg								
Ca 7,5 mg								
Ca 10 mg								

Gambar IV. 13 Evaluasi Visual Kesegaran Buah Tomat

BAB V

PENUTUP

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan pembahasan dari bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan bahwa

1. Film bioplastik multilapis berhasil disintesis melalui metode *Layer-by-Layer* dengan menggunakan larutan kitosan-PVA yang ditaut silang menggunakan natrium tripolifosfat (STPP) sebagai lapisan pertama, serta larutan natrium alginat-gliserol yang ditaut silang menggunakan kalsium asetat hasil sintesis dari cangkang telur sebagai lapisan kedua. Proses sintesis ini menghasilkan film yang transparan, lentur, dan stabil secara fisik, dan berpotensi ramah lingkungan.
2. Penambahan kalsium asetat memberikan pengaruh terhadap sifat fisik, mekanik, dan permeabilitas film, yang meliputi berat dan ketebalan, kuat Tarik, hidrofilitas, serapan uap air, *Swelling*, *water vapour transmission rate*, porositas, kadar air. Film juga menunjukkan sifat biodegradasi yang bertahap serta potensi sebagai pengemas aktif melalui uji aplikasi pada buah tomat.
3. Evaluasi efektivitas film bioplastik sebagai kemasan aktif terhadap buah tomat menunjukkan bahwa film dengan konsentrasi Ca optimum mampu memperpanjang daya simpan hingga 49 hari pada suhu ruang. Selain itu, film tersebut mampu menjaga tampilan visual buah, mencegah kerutan dan kerusakan, serta membentuk penghalang kelembapan yang efektif. Hasil ini menunjukkan bahwa film bioplastik yang dikembangkan memiliki potensi aplikatif dalam pengemasan pangan yang berkelanjutan.

V.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, disarankan agar dilakukan uji lanjutan menggunakan analisis morfologi permukaan (SEM) dan struktur kristalin (XRD) setelah proses penyimpanan atau aplikasi film terhadap buah segar. Uji ini bertujuan untuk mengetahui perubahan struktur internal film akibat ikatan dengan uap air, permukaan buah, maupun lingkungan penyimpanan. Selain itu, penting untuk mengevaluasi aspek keamanan film terhadap pangan melalui uji migrasi zat aktif dan potensi toksisitas, agar penggunaan film ini sesuai dengan standar *food-contact* material yang berlaku. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk memperluas aplikasi film pada berbagai jenis komoditas hortikultura tropis lainnya, sehingga efektivitas dan daya guna film dapat dikembangkan secara lebih luas dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abasalizadeh, F., Moghaddam, S. V., Alizadeh, E., Akbari, E., Kashani, E., Fazljou, S. M. B., & Khosh, M. H. M. (2020). Alginate-based hydrogels for biomedical applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 712-731. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.211>
- Abd El-Hack, M. E., El-Saadony, M. T., Shafi, M. E., Zabermawi, N. M., Arif, M., Batiha, G. E., Khafaga, A. F., Abd El-Hakim, Y. M., & Al-Sagheer, A. A. (2020). Antimicrobial and antioxidant properties of chitosan and its derivatives and their applications: A review. *Dalam International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 164). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.153>
- Aderibigbe, B. A., & Buyana, B. (2018). Alginate in wound dressings. *Pharmaceutics*, 11(4), 78.
- Ahmed, S., & Ikram, S. (2016). Chitosan Based Scaffolds and Their Applications in Wound Healing. *Achievements in the Life Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.1016/j.als.2016.04.001>
- Arrieta, M. P., López, J., Ferrándiz, S., & Peltzer, M. A. (2014). Characterization of PLA-limonene blends for food packaging applications. *Polymer Testing*, 32(4), 760-768. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.12.01>
- Aydi, F., Albougami, R., Al-Salhi, O., & Ali, A. (2023). Sodium alginate: A green biopolymer resource-based for edible film applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 124391. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124391>
- Bajpai, S. K., & Sharma, S. (2004). Investigation of *Swelling*/degradation behaviour of alginate beads crosslinked with Ca^{2+} and Ba^{2+} ions. *Reactive and Functional Polymers*, 59(2), 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2004.01.002>
- Barboza, L. G. A., Vieira, L. R., Branco, V., Figueiredo, N., Carvalho, F., Carvalho, C., & Guilhermino, L. (2018). Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy-related changes and interact with the bioaccumulation of mercury in the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758). *Aquatic Toxicology*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.12.008>
- Bercea, M. (2024). Recent advances in poly(vinyl alcohol)-based hydrogels. *Polymers*, 16(14), 2021. <https://doi.org/10.3390/polym16142021>

- Bhatia, A., Jawad, M., Khan, T. S., Shah, Y. A., Al-Harrasi, A., & Aydemir, L. Y. (2024). Development of STPP crosslinked alginate-chitosan biopolymer films for antioxidant food packaging. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 103287. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103287>
- Bouazid Rekik, S., Gassara, S., Bouaziz, J., Baklouti, S., & Deratani, A. (2023). Performance Enhancement of Kaolin/Chitosan Composite-Based Membranes by Cross-Linking with Sodium Tripolyphosphate: Preparation and Characterization. *Membranes*, 13(2), 229. <https://doi.org/10.3390/membranes13020229>
- Braccini, I., & Pérez, S. (2001). Molecular basis of Ca^{2+} -induced gelation in alginates and pectins: The *egg-box* model revisited. *Biomacromolecules*, 2(4), 1089-1096.
- Brandrup, J., Immergut, E. H., & Grulke, E. A. (Eds.). (2004). *Polymer Handbook* (4th ed.). Wiley.
- Brettfeld, E.-G., Popa, D.-G., Somoghi, R., Nicolae, C. A., Birtas, A., Constantinescu-Aruxandei, D., & Oancea, F. (2023). The preparation and characterization of different types of eggshells acidified with acetic acid. *Chemistry Proceedings*, 13(1), 32. <https://doi.org/10.3390/chemproc2023013032>
- Budi, S., Suliasih, B. A., Rahmawati, I., & Erdawati. (2020). Size-controlled chitosan nanoparticles prepared using ionotropic gelation. *ScienceAsia*, 46(4), 457-461. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2020.059>
- Caicedo, C., Díaz-Cruz, C. A., Jiménez-Regalado, E. J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2022). Effect of *plasticizer* content on mechanical and water vapor permeability of maize starch/PVOH/chitosan composite films. *Materials*, 15(4), 1274. <https://doi.org/10.3390/ma15041274>
- Calvo, P., Remuñán-López, C., Vila-Jato, J. L., & Alonso, M. J. (1997). Novel hydrophilic chitosan-polyethylene oxide nanoparticles as protein carriers. *Journal of Applied Polymer Science*, 63(1), 125-132. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970103\)63:1<125::AID-APP13>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970103)63:1<125::AID-APP13>3.0.CO;2-4)
- Carvalho, F. A., Bilck, A. P., Yamashita, F., & Mali, S. (2019). Polyvinyl alcohol films with different degrees of hydrolysis and polymerization. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, 40(2), 169-178.
- Chiellini, E., Corti, A., & Solaro, R. (1999). Biodegradation of poly(vinyl alcohol) based blown films under different environmental conditions. *International*

- Biodeterioration & Biodegradation, 43(2-3), 69-76.
[https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(98\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)00085-0)
- Cucina, M. (2023). The lesser of two evils: Enhancing *biodegradable* bioplastics use to fight plastic pollution requires policy makers interventions in Europe. *Environmental Impact Assessment Review*, 103.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107230>
- DanaitNabar, S., Gharat, K., & Singhal, R. S. (2025). Sodium tripolyphosphate is a nontoxic and economic alternative to glutaraldehyde for preparation of Lasparaginase CLEAs to reduce acrylamide in potato fries. *Food Chemistry*, 472, 142894.
- Dash, M., Chiellini, F., Ottenbrite, R. M., & Chiellini, E. (2011). Chitosan-A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 36(8), 981-1014.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.02.001>
- Decher, G., & Schlenoff, J. B. (2012). *Multilayer thin films: Sequential assembly of nanocomposite materials: Second edition (Vol. 1-2)*.
<https://doi.org/10.1002/9783527646746>
- Draget, K. I., Smidsrød, O., & Skjåk-Bræk, G. (2006). Alginates from algae. In P. A. Williams (Ed.), *Polysaccharides and their derivatives* (pp. 1-30). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781847550124-00001>
- EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS). (2019). Re-evaluation of phosphates as food additives. *EFSA Journal*, 17(6), 5674.
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5674>
- Elsabee, M. Z., & Abdou, E. S. (2013). Chitosan based edible films and coatings: A review. *Dalam Materials Science and Engineering C* (Vol. 33, Nomor 4).
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.01.010>
- Eslami, Z., Elkoun, S., Robert, M., & Adjallé, K. (2023). A review of the effect of *plasticizer* s on the physical and mechanical properties of alginate-based films. *Molecules*, 28(18), 6637.
<https://doi.org/10.3390/molecules28186637>
- European Commission. (2011). Commission Regulation (EU) No 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food.
- Fabra, M. J., Hambleton, A., Talens, P., Debeaufort, F., & Chiralt, A. (2010). Influence of interactions on water and aroma permeability of sodium caseinate-beeswax films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(10), 6354-6364. <https://doi.org/10.1021/jf9045046>

- FAO. (2019). The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. The. Dalam Routledge Handbook of Religion and Ecology.
- Fu, Z.-Z., Guo, S.-J., Li, C.-X., Wang, K., Zhang, Q., & Fu, Q. (2022). Hydrogen-bond-dominated mechanical stretchability in PVA films: from phenomenological to numerical insights. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(3), 1885-1895. <https://doi.org/10.1039/D1CP03893A>
- Gewert, B., Plassmann, M. M., & Macleod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. Dalam *Environmental Sciences: Processes and Impacts* (Vol. 17, Nomor 9). <https://doi.org/10.1039/c5em00207a>
- Giz, A. S., Berberoglu, M., Bener, S., Aydelik-Ayazoglu, S., Bayraktar, H., Alaca, B. E., & Catalgil-Giz, H. (2020). A detailed investigation of the effect of calcium crosslinking and glycerol plasticizing on the physical properties of alginate films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.103>
- Gontard, N., Guilbert, S., & Cuq, J. L. (1994). Edible wheat gluten films: Influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 59(3), 493-496. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb05553.x>
- Grant, G. T., Morris, E. R., Rees, D. A., Smith, P. J. C., & Thom, D. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The *egg-box* model. *FEBS Letters*, 32(1), 195-198. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80518-4](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80518-4)
- Grant, G. T., Morris, E. R., Rees, D. A., Smith, P. J. C., & Thom, D. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The *egg-box* model. *FEBS Letters*, 32(1), 195-198. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7)
- Grant, G. T., Morris, E. R., Rees, D. A., Smith, P. J. C., & Thom, D. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The *egg-box* model. *FEBS Letters*, 32(1), 195-198. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7)
- Haider, T. P., Völker, C., Kramm, J., Landfester, K., & Wurm, F. R. (2019). Plastics of the Future? The Impact of *Biodegradable* Polymers on the Environment and on Society. Dalam *Angewandte Chemie - International Edition* (Vol. 58, Nomor 1). <https://doi.org/10.1002/anie.201805766>
- Harussani, M. M., Sapuan, S. M., Firdaus, A. H. M., El-Badry, Y. A., Hussein, E. E., & El-Bahy, Z. M. (2021). Determination of the tensile properties and

- biodegradability of cornstarch-based biopolymers plasticized with sorbitol and glycerol. *Polymers*, 13(21), 3709. <https://doi.org/10.3390/polym13213709>
- Hu, Y., Li, X., Zhang, Y., & Chen, G. (2018). Dual-crosslinked amorphous polysaccharide hydrogels based on chitosan/alginate for wound healing applications. *Carbohydrate Polymers*, 198, 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.112>
- Huang, J., Wang, Q., & Zhang, H. (2020). Influence of UV and moisture exposure on the degradation mechanism of chitosan-based bioplastics. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116689.
- Huang, M., Wang, Y., Liu, D., & Wang, W. (2020). Acid-catalyzed in-situ cross-linking of polyol on sodium alginate to improve its strength and hydrophobic properties. *Carbohydrate Polymers*, 237, 116177. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116177>
- Hwang, J., Choi, D., Han, S., Choi, J., & Hong, J. (2019). An assessment of the toxicity of polypropylene microplastics in human derived cells. *Science of the Total Environment*, 684. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.071>
- Islam, M. K., Tusty, T. A., Akhand, A. A., & Ahsan, N. (2019). Human uptake of eggshell powder as an alternate source of calcium: Assessment of heavy metal contamination. *Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences*, 18(2), 249-255
- Jain, N., Singh, V. K., & Chauhan, S. (2017). A review on mechanical and water absorption properties of polyvinyl alcohol based composites/films. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 26(5-6), 213-222. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2017-0027>
- Jamal, T., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol *plasticizer* loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11, 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2012). Edible and *biodegradable* starch films: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2058-2076. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0835-4>
- Jonassen, H., Kjøniksen, A.-L., & Hiorth, M. (2012). Stability of chitosan nanoparticles cross-linked with sodium tripolyphosphate. *Biomacromolecules*, 13(11), 3747-3756. <https://doi.org/10.1021/bm301207a>

- Jørgensen, T. E., Sletmoen, M., Draget, K. I., & Stokke, B. T. (2007). Evidence for *egg-box*-compatible interactions in calcium-alginate gels from fiber X-ray diffraction. *Biomacromolecules*, 8(8), 2388-2397. <https://doi.org/10.1021/bm070208d>
- Jorjani, M., Ebrahimi, M., Ghaffari, S. M., & Mahdavi, M. (2022). Preparation and in vitro characterization of chitosan nanoparticles containing Mesobuthus eupeus scorpion venom as an antigen delivery system. *Scientific Reports*, 12(1), 22274. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26785-5>
- Jost, W., & Reinelt, T. (2016). Effect of Ca^{2+} induced crosslinking on the mechanical and barrier properties of cast alginate films. *Food Hydrocolloids*, 51, 383-389. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.06.013>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). Data timbulan sampah nasional tahun 2024. Jakarta: Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah.
- Kim, H. J., Lee, K., Kumar, S., & Kim, J. (2005). Dynamic sequential layer-by-layer deposition method for fast and region-selective multilayer thin film fabrication. *Langmuir*, 21(18). <https://doi.org/10.1021/la0511182>
- Komoto, D., Furuike, T., & Tamura, H. (2022). Preparation of polyelectrolyte complex gel of sodium alginate with chitosan using basic solution of chitosan. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(4), 1536-1544. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02273-7>
- Kulkarni, A. R., Kulkarni, B. A., & Sohankar, S. (2000). Preparation of cross-linked sodium alginate microparticles using glutaraldehyde in methanol. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 26(10), 1121-1124. <https://doi.org/10.1081/DDC-100100278>
- Kwok, D. Y., & Neumann, A. W. (1999). Contact angle interpretation in terms of solid surface tension. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 161(1), 31-48. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(99\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(99)00107-6)
- Łabowska, M. B., Cierpiszewski, R., & Król, J. J. (2019). Methods of extraction, physicochemical properties of alginates and their applications in biomedical field - a review. *Open Chemistry*, 17(1), 738-751. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0085>
- Larobina, D., & Cipelletti, L. (2013). Hierarchical cross-linking in physical alginate gels: A rheological and dynamic light scattering investigation. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1309.6349>

- Larobina, D., & Cipelletti, L. (2013). Hierarchical cross-linking in physical alginate gels: A rheological and dynamic light scattering investigation. *Soft Matter*, 9(42), 10005-10015. <https://doi.org/10.1039/C3SM52006D>
- Li, W. C., Tse, H. F., & Fok, L. (2016). Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Dalam Science of the Total Environment* (Vol. 566-567). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>
- Li, X., Chen, Y., & Wang, Z. (2024). Chitosan-based composite featuring dual cross-linking networks for the removal of aqueous Cr(VI). *International Journal of Biological Macromolecules*, 244, 125836. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125836>
- Lin, C., Lu, T. W., Hsu, F., Huang, T. W., Ho, M. H., Lu, H.-T., & Mi, F.-L. (2025). An injectable in situ-forming hydrogel with self-activating genipin-chitosan cross-linking and an O₂/Ca²⁺ self-supplying capability for wound healing and rapid hemostasis. *Carbohydrate Polymers*, 351, 123051. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.123051>
- Liu, Y., Wang, S., & Li, L. (2022). Studies on formulation and in vitro evaluation of PVA/chitosan blend films for drug delivery. *ACS Applied Bio Materials*, 5(3), 1302-1310. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c01209>
- Madhu, K. P., Dhal, M. K., Banerjee, A., & Kumar, A. (2025). Melt-processed cast films of calcite reinforced starch/guar-gum biopolymer composites for packaging applications. *Journal of Materials Science*. (Submitted January 2025).
- Malektaj, H., Drozdov, A. D., & Christiansen, J. d. C. (2023). Mechanical properties of alginate hydrogels cross-linked with multivalent cations. *Polymers*, 15(14), 3012. <https://doi.org/10.3390/polym15143012>
- Mohammed, A. A. B. A., Hasan, Z., Omran, A. A. B., Elfaghi, A. M., Khattak, M. A., Ilyas, R. A., & Sapuan, S. M. (2023). Effect of various *plasticizer* s in different concentrations on physical, thermal, mechanical, and structural properties of wheat starch-based films. *Polymers*, 15(1), 63. <https://doi.org/10.3390/polym15010063>
- Moustafa, H., Guizani, C., Dufresne, A., & Kahouli, A. (2022). Characterization of ionically crosslinked alginate films: Effect of different anion-based metal cations on the improvement of water-resistant properties. *Polymers*, 14(12), 2433.
- Müller, C. M. O., Laurindo, J. B., & Yamashita, F. (2012). Effect of cellulose fibers on the barrier properties of *biodegradable* films. *Journal of Food*

- Engineering, 102(3), 189-195.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.08.007>
- Ngo, D. H., & Kim, S. K. (2014). Antioxidant effects of chitin, chitosan, and their derivatives. Dalam *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 73). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800268-1.00002-0>
- Nugraheni, A. D., Purnawati, D., & Kusumaatmaja, A. (2018). Physical evaluation of PVA/chitosan film blends with glycerine and calcium chloride. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011, 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012052>
- Nunes de Lima Moreira, M., Vieira Moreira, F. K., & Nunes de Lima Moreira, M. (2023). Effect of adding micronized eggshell waste particles on the properties of *biodegradable* pectin/starch films. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140229>
- OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. Global Plastics Outlook.
- Olivas, G. I., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2008). Alginate-calcium films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by *plasticizer* and relative humidity. *LWT - Food Science and Technology*, 41(2), 359-366. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.02.009>
- Oun, A. A., Shin, G. H., Rhim, J. W., & Kim, J. T. (2022). Recent advances in polyvinyl alcohol-based composite films and their applications in food packaging. Dalam *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 34). <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100991>
- Park, S., Han, U., Choi, D., & Hong, J. (2018). Layer-by-layer assembled polymeric thin films as prospective drug delivery carriers: Design and applications. *Biomaterials Research*, 22. <https://doi.org/10.1186/s40824-018-0139-5>
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., & Vyvyan, J. R. (2015). *Introduction to spectroscopy* (5th ed.). Cengage Learning.
- Phumkacha, A., Leejarkpai, T., & Kirdponpattara, S. (2023). Effects of *plasticizer* s on physical and mechanical properties of tamarind kernel powder biopolymer films. *Materials Science Forum*, 1098, 65-69. <https://doi.org/10.4028/p-NBII0n>
- Phuong, N. N., Zalouk-Vergnoux, A., Poirier, L., Kamari, A., Châtel, A., Mouneyrac, C., & Lagarde, F. (2016). Is there any consistency between the microplastics found in the field and those used in laboratory experiments? Dalam *Environmental Pollution* (Vol. 211). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.035>

- Qureshi, D., Sahoo, A., Mohanty, B., Anis, A., Kulikouskaya, V., Hileuskaya, K., Kujawa, J., & Knozowska, K. (2021). Fabrication and characterization of poly(vinyl alcohol) and chitosan oligosaccharide-based blend films. *Gels*, 7(2), 55.
- Rhim, J.-W. (2004). Physical and chemical properties of water-resistant sodium alginate films. *LWT - Food Science and Technology*, 37(3), 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.09.008>
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. Dalam *Progress in Polymer Science (Oxford)* (Vol. 31, Nomor 7). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Roquero, D. M., Bollella, P., Katz, E., & Melman, A. (2021). Controlling porosity of calcium alginate hydrogels by interpenetrating polyvinyl alcohol-diboronate polymer network. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(3), 1455-1463. <https://doi.org/10.1021/acsapm.0c01358>
- Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. Dalam *Nature Reviews Materials* (Vol. 7, Nomor 2). <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Russo, R., Malinconico, M., & Santagata, G. (2007). Effect of cross-linking with calcium ions on the physical properties of alginate films. *Biomacromolecules*, 8(10), 3193-3197. <https://doi.org/10.1021/bm700565h>
- Russo, R., Malinconico, M., & Santagata, G. (2007). Effect of the cross-linking with calcium ions on the structural and thermo-mechanical properties of alginate films. *Biomacromolecules*, 8(10), 3193-3197. <https://doi.org/10.1021/bm700565h>
- Sandıkçı, M. N., & Isik, B. (2025). Fabrication of calcium alginate/gum arabic/eggshell powder composite microbeads for adsorptive removal of methylene blue dye from aqueous solutions. *Macromolecular Research*. Advance online publication. link.springer.com
- Saswat, M., & Maheshwari, S. (2022). Development of *biodegradable* calcium alginate films for packaging applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(5), 1892-1902. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02255-5>
- Schlegel, T. K., & Schönherr, J. (2002). Cuticular penetration of calcium salts: Effects of humidity, anions, and adjuvants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(2), 174-178. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200204\)165:2<174::AID-JPLN174>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200204)165:2<174::AID-JPLN174>3.0.CO;2-Z)

- Seesanong, S., Seangarun, C., Boonchom, B., Laohavisuti, N., Boonmee, W., Thompho, S., & Rungrojchaipon, P. (2024). Low-cost and eco-friendly calcium oxide prepared via thermal decompositions of calcium carbonate and calcium acetate precursors derived from waste oyster shells. *Materials*, 17(15), 3875. <https://doi.org/10.3390/ma17153875>
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., & Palanisami, T. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested - A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>
- Senturk Parreidt, T., Müller, K., & Schmid, M. (2018). Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods*, 7(10), 170. <https://doi.org/10.3390/foods7100170>
- Shtein, M., Paul-Ehrlich, O., Shoseyov, O., & Domb, A. J. (2016). A new insight to the effect of calcium concentration on gelation process and physical properties of alginate films. *Journal of Materials Science*, 51, 5791-5801. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9945-2>
- Silva, A. B., Bastos, A. S., Justino, C. I. L., da Costa, J. P., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. A. P. (2018). Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review. *Dalim Analytica Chimica Acta* (Vol. 1017). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.043>
- Singh, S., Habib, M., Rao, E. S., Kumar, Y., Bashir, K., Jan, S., & Jan, K. (2024). A comprehensive overview of *biodegradable* packaging films: Part I- sources, additives, and preparation methods. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.eXXXXX>
- Siti Xuan, T., Mohd Ishak, N. S., & Ahmad, I. (2021). Effect of chitosan reinforcement on the mechanical and water absorption properties of starch-based bioplastic films. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 1590-1601. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-02000-0>
- Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy* (2nd ed.). CRC Press.
- Solaro, R., Corti, A., & Chiellini, E. (2000). Biodegradation of poly(vinyl alcohol) with different molecular weights and degree of hydrolysis. *Polymers for Advanced Technologies*, 11(8-12), 873-878. [https://doi.org/10.1002/1099-1581\(200008/12\)11:8/12<873::AID-PAT35>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/1099-1581(200008/12)11:8/12<873::AID-PAT35>3.0.CO;2-V)
- Sothornvit, R., & Krochta, J. M. (2000). *Plasticizer* effect on mechanical properties of β -lactoglobulin films. *Journal of Food Engineering*, 50(3), 149-155. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00103-0)

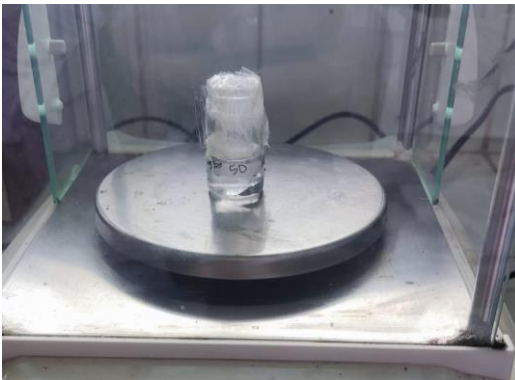
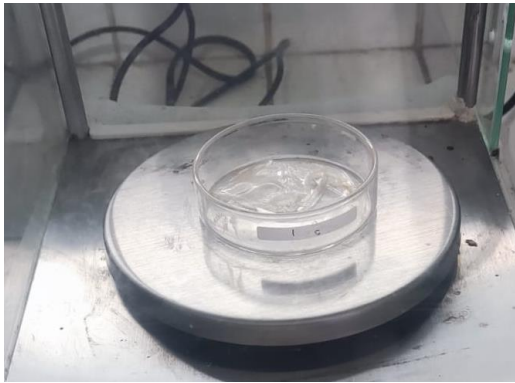
- Strelec, I., Tomičić, Z., Zajec, Z., Ostojić, S. B., & Budžaki, S. (2023). Eggshell-waste-derived calcium acetate, calcium hydrogen phosphate and corresponding eggshell membranes. *Applied Sciences*, 13(2), 987. <https://doi.org/10.3390/app13020987>
- Su, C. Y., Li, D., & Wang, L. J. (2025). From micropores to mechanical strength: Fabrication and characterization of edible corn starch-sodium alginate double network hydrogels with Ca^{2+} cross-linking. *Food Chemistry*, 467, 142276. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142276>
- Szekalska, M., Puciłowska, A., Szymańska, E., Ciosek, P., & Winnicka, K. (2021). Development of double crosslinked sodium alginate/chitosan based hydrogels for controlled release of metronidazole and its antibacterial activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(4), 1764. <https://doi.org/10.3390/ijms22041764>
- Szekalska, M., Puciłowska, A., Szymańska, E., Ciosek, P., & Winnicka, K. (2016). Alginate: Current use and future perspectives in pharmaceutical and biomedical applications. *International Journal of Polymer Science*, 2016, Article ID 7697031.
- Szymańska, E., & Winnicka, K. (2015). Stability of chitosan-a challenge for pharmaceutical and biomedical applications. *Marine Drugs*, 13(4), 1819-1846. <https://doi.org/10.3390/md13041819>.
- Tang, X., Alavi, S., & Herald, T. J. (2008). Barrier and mechanical properties of starch-clay nanocomposite films. *Cereal Chemistry*, 85(3). <https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-3-0433>
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol *plasticizer* loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot starch biopolymer films. *Scientific Reports*, 11, Article 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
- Tarique, J., Sapuan, S. M., Sherif, E. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol on the structure and properties of thermoplastic starch/poly(butylene succinate) composites: FTIR and SEM analysis. *Scientific Reports*, 11, 10861. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90356-0>
- Van Rooyen, B., De Wit, M., Osthoff, G., Van Niekerk, J., & Hugo, A. (2023). Microstructural and Mechanical Properties of Calcium-Treated Cactus Pear Mucilage (*Opuntia* spp.), Pectin and Alginate Single-Biopolymer Films. *Polymers*, 15(21), 4295. <https://doi.org/10.3390/polym15214295>
- Vanthana Sree, K., & Nagaraaj, R. (2022). Enhancement of PVA packaging using calcined eggshell waste. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100983. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100983>

- Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G., & Zhang, P. (2019). Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review. *Dalam Science of the Total Environment* (Vol. 691). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209>
- Wang, X., Du, Y., Fan, L., Liu, H., & Hu, Y. (2005). Chitosan- metal complexes as antimicrobial agent: Synthesis, characterization and Structure-activity study. *Polymer Bulletin*, 55(1-2). <https://doi.org/10.1007/s00289-005-0414-1>
- Weligama Thuppahige, V. T., & Karim, M. A. (2022). A comprehensive review on the properties and functionalities of *biodegradable* and *semibiodegradable* food packaging materials. *Dalam Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 21, Nomor 1). <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12873>
- Weng, Y. X., Wang, L., Zhang, M., Wang, X. L., & Wang, Y. Z. (2013). Biodegradation behavior of P(3HB,4HB)/PLA blends in real soil environments. *Polymer Testing*, 32(1). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.09.014>
- Wong, J. P., & Azmi, N. S. (2020). Recent advances in alginate-based films for food packaging applications. *Polymers*, 12(12), 2776. <https://doi.org/10.3390/polym12122776>
- World Bank. (2021). *Indonesia Economic Prospects (Boosting The Recovery)*. World Bank Group, Juni.
- Yang, H., Wu, Y., Zhao, Y., & Zhang, M. (2022). Preparation and properties of PVA/chitosan *biodegradable* composite films. *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 474-483.
- Yao, Y., Zhang, J., Zhang, R., Shi, Y., An, P., Hu, X., & Wan, Y. (2022). Optimization of preparation of calcium acetate from eggshell by response surface methodology. *Food Science and Technology (Campinas)*, 42, e114421. <https://doi.org/10.1590/fst.114421>
- Yuan, Y., & Lee, T. R. (2013). Contact angle and wetting properties. In G. Bracco & B. Holst (Eds.), *Surface science techniques* (pp. 3-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1_1
- Yusefi, M., Kia, P., Mohamad Sukri, S. N. A., Ali, R. R., & Shameli, K. (2021). Synthesis and Properties of Chitosan Nanoparticles Cross-Linked with Tripolyphosphate. *Journal of Research in Nanoscience and Nanotechnology*, 3(1), 46-52. <https://doi.org/10.37934/jrnn.3.1.4652>

- Zactiti, E. M., & Kieckbusch, T. G. (2009). Release of potassium sorbate from active films of sodium alginate crosslinked with calcium chloride. *Packaging Technology and Science*, 22(6), 349-358. <https://doi.org/10.1002/pts.858>
- Zehra, A., Wani, S. M., Jan, N., Bhat, T. A., Rather, S. A., Malik, A. R., & Hussain, S. Z. (2022). Development of chitosan-based *biodegradable* films enriched with thyme essential oil and additives for potential applications in packaging of fresh collard greens. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20751-1>
- Zeng, W., Peng, R., Gao, D., Lin, J., Zeng, J., Li, Z., Xia, Z., & Wang, D. (2024). Chitosan-alginate sponge with multiple cross-linking networks for adsorption of anionic dyes. *Journal of Chromatography A*, 1713, 464507. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.464507>
- Zhang, J., Zhang, J., Huang, X., Arslan, M., Shi, J., Li, Z., & Zou, X. (2023). Fabrication and characterization of polyvinyl alcohol/sodium alginate/zein/chitosan bilayer film for dynamic visualization of pork quality. *International Journal of Biological Macromolecules*, 243, 125065. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125065>
- Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Dalam Earth-Science Reviews* (Vol. 203).
- Zhang, Z., Zeng, J., Groll, J., & Matsusaki, M. (2022). Layer-by-layer assembly methods and their biomedical applications. *Biomaterials Science*, 10(15). <https://doi.org/10.1039/d2bm00497f>
- Zinina, O., Basyrova, L., Shalakhmetov, M., & Zainullin, R. (2023). Biodegradation and barrier properties of sodium alginate-based films crosslinked with calcium ions. *Sustainability*, 15(7), 5894. <https://doi.org/10.3390/su15075894>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Penelitian

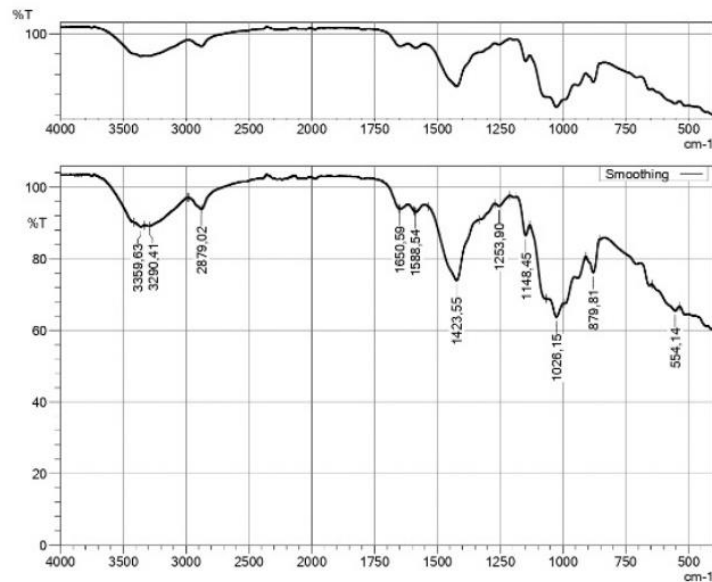


Lampiran 2. Hasil Uji FTIR

a. Kitosan

24/01/2025
12:51:05

Item	Value
Acquired Date&Time	24/01/2025 12:46:06
Acquired By	System Administrator
Filename	U:\2020-AZAM-1507\New folder\CS4.rpd
Measure Parameter File	
Report Template	
Spectrum name	Smoothing
Sample name	CS
Sample ID	CS
Option	
Comment	
No. of Scans	25
Resolution	0.9 [cm-1]
Apodization	Hann-Genzel



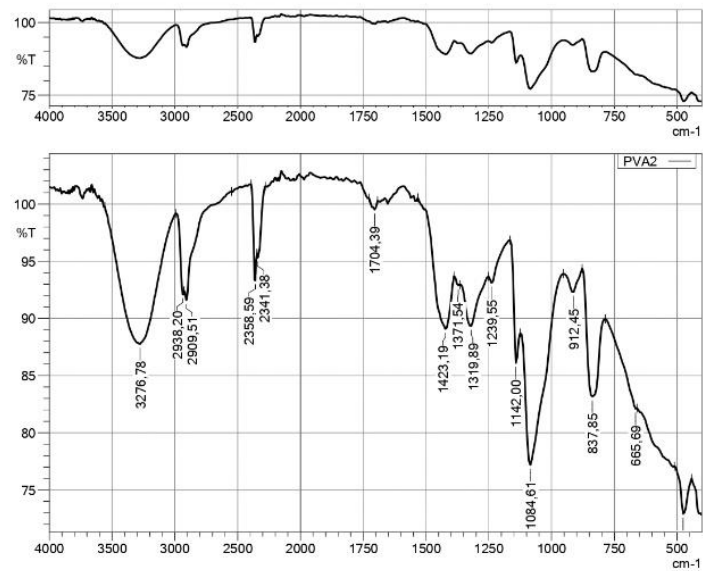
24/01/2025
12:51:05

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	554,14	65,43	2,20	646,32	536,92	3438,853	130,245	
2	879,81	76,13	7,04	908,86	854,70	1112,430	191,820	
3	1026,15	63,72	4,36	1066,32	996,38	2339,057	113,638	
4	1148,45	86,48	5,41	1184,68	1131,95	457,590	106,840	
5	1253,90	94,67	1,37	1271,12	1211,58	246,691	39,134	
6	1423,55	73,95	18,60	1535,09	1332,45	3205,163	1732,715	
7	1588,54	93,02	0,10	1593,92	1587,46	44,269	0,644	
8	1650,59	93,83	0,10	1653,10	1649,15	24,080	0,282	
9	2879,02	93,77	0,04	2980,52	2877,94	463,682	-5,919	
10	3290,41	89,08	0,04	3291,85	2987,70	2224,416	116,407	
11	3359,63	88,85	0,72	3417,74	3332,38	903,653	26,078	

b. PVA

24/01/2025
09:12:22

Item	Value
Acquired Date&Time	24/01/2025 09:10:25
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\Adda-2401\PVA2.ispd
Measure Parameter File	
Report Template	
Spectrum name	PVA2
Sample name	PVA
Sample ID	
Option	
Comment	
No. of Scans	20
Resolution	16 [cm-1]
Apodization	Happ-Genzel



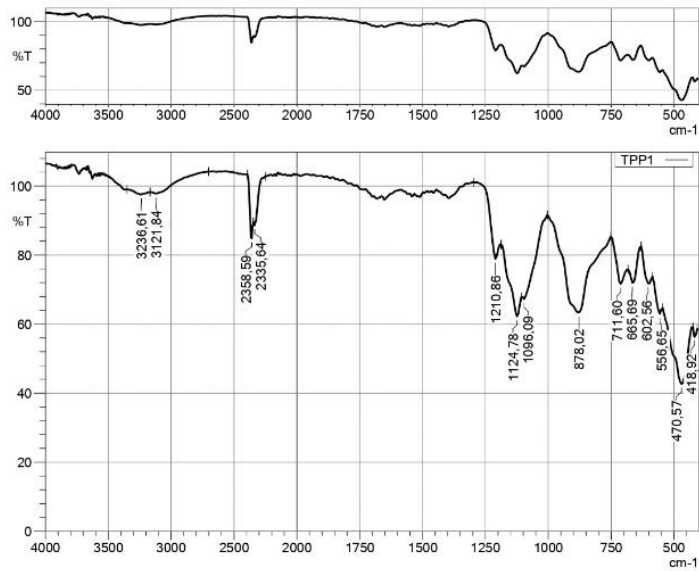
24/01/2025
09:12:22

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	476.31	72.91	3.62	510.74	441.88	1719.366	103.625	
2	665.69	82.11	0.41	786.20	659.95	1731.847	-28.117	
3	837.85	83.17	9.26	878.02	786.20	1174.175	454.123	
4	912.45	92.31	1.83	952.62	878.02	503.645	65.830	
5	1084.61	77.19	12.74	1124.78	952.62	2501.035	1005.723	
6	1142.00	86.11	6.10	1164.95	1124.78	382.306	92.619	
7	1239.55	93.12	0.97	1251.03	1164.95	419.985	11.837	
8	1319.89	89.33	3.91	1365.80	1251.03	965.397	197.366	
9	1371.54	92.89	0.25	1388.76	1365.80	156.016	2.734	
10	1423.19	89.10	6.24	1532.23	1388.76	823.497	409.902	
11	1704.39	99.51	0.86	1727.34	1692.91	4.145	18.194	
12	2341.38	95.30	0.87	2347.12	2278.25	115.511	20.453	
13	2358.59	93.34	3.86	2393.03	2347.12	141.923	82.695	
14	2909.51	91.61	1.18	2926.72	2547.97	584.575	-648.667	
15	2938.20	92.13	1.50	2989.85	2926.72	266.220	0.320	
16	3276.78	87.76	11.73	3557.98	2989.85	3983.219	3690.321	

c. STPP

24/01/2025
09:31:40

Item	Value
Acquired Date&Time	24/01/2025 09:30:36
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\Aldi-2401\TPP1.ispd
Measure Parameter File	
Report Template	
Spectrum name	TPP1
Sample name	TPP
Sample ID	
Option	
Comment	
No. of Scans	20
Resolution	16 [cm-1]
Apodization	Happ-Genzel



24/01/2025
09:31:40

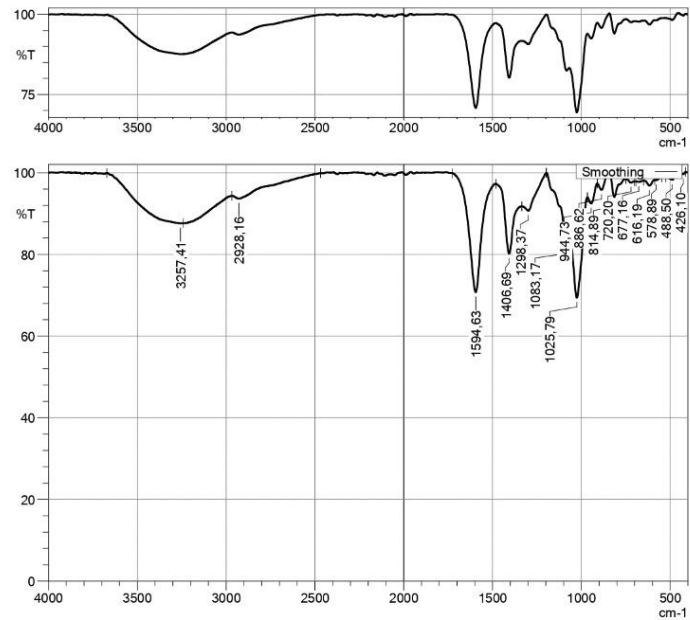
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	418,92	56,30	2,64	424,66	407,45	734,223	25,988	
2	470,57	42,69	18,53	545,17	424,66	5757,858	1164,177	
3	556,65	63,03	4,22	585,34	545,17	1334,439	96,754	
4	602,56	71,80	5,26	631,25	585,34	1151,856	149,289	
5	665,69	72,03	6,06	682,90	631,25	1230,887	157,435	
6	711,60	71,66	8,12	751,77	682,90	1597,905	259,978	
7	878,02	63,40	25,08	1004,27	751,77	5823,786	2914,181	
8	1096,09	67,30	3,20	1107,56	1004,27	2226,488	134,909	
9	1124,78	62,25	8,87	1187,91	1107,56	2325,936	355,604	
10	1210,86	78,94	7,93	1296,94	1187,91	805,281	-59,194	
11	2335,64	88,64	2,48	2347,12	2249,56	275,737	-97,172	
12	2358,59	84,82	8,20	2393,03	2347,12	337,831	176,733	
13	3121,84	97,84	1,02	3167,75	2702,91	-569,677	2,198	
14	3236,61	97,58	0,97	3351,38	3167,75	335,991	87,035	

d. NA

13/06/2025
12:52:24

System Administrator

Item	Value
Acquired Date&Time	13/06/2025 12:48:53
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\Juni\Jesaya-1306\SA1.ispd
Measure Parameter File	D:\Parameter Pengujian\Interval 0.72.iscp
Spectrum name	Smoothing
Sample name	SA
Sample ID	SA
No. of Scans	25
Resolution	2 [cm ⁻¹]
Apodization	Happ-Genzel

13/06/2025
12:52:24

System Administrator

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	426.10	99.64	0.66	454.07	412.47	-0.522	14.116	
2	488.50	98.28	1.46	525.81	454.07	70.920	50.585	
3	578.89	98.18	0.18	587.50	548.04	59.939	3.101	
4	616.19	96.84	1.32	650.62	587.50	151.938	34.966	
5	677.16	97.74	0.21	692.94	650.62	89.748	4.094	
6	720.20	97.60	0.55	749.61	700.12	101.160	12.164	
7	814.89	94.05	5.72	842.87	749.61	271.186	216.020	
8	886.62	95.80	2.60	910.30	842.87	160.903	82.819	
9	944.73	92.50	2.79	966.25	910.30	323.438	81.741	
10	1025.79	69.38	18.34	1068.11	966.25	2059.802	900.961	
11	1083.17	82.45	2.77	1197.23	1068.11	1074.130	-6.524	
12	1298.37	90.72	3.22	1334.96	1197.23	762.271	194.578	
13	1406.69	80.21	14.28	1480.58	1334.96	1460.232	663.424	
14	1594.63	70.76	27.75	1725.19	1480.58	2542.016	2197.809	
15	2928.16	93.68	1.11	2967.61	2468.35	1473.738	45.092	
16	3257.41	87.62	0.49	3671.32	3241.63	3341.679	679.479	

e. CaO

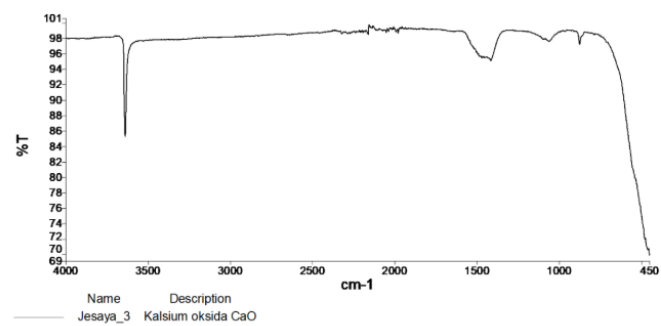
PerkinElmer Spectrum IR 10.7.2

16/12/2024 10:47:08

Sample Details

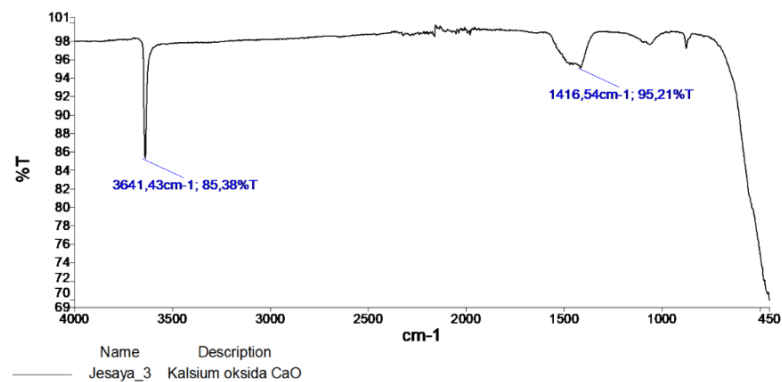
Filename C:\pel_data\spectra\Jesaya_3.sp
 Creation Date 16/12/2024 10:36:14
 Analyst Administrator
 X-Axis Units cm-1
 X-Axis start value 4000
 X-Axis end value 450
 Data interval -1
 Number of points 3551
 Y-Axis Units %T
 Z-Axis Units
 Description Kalsium oksida CaO

Spectrum



PerkinElmer Spectrum IR 10.7.2

16/12/2024 10:47:08



Peak Table

Peak Number	X (cm-1)	Y (%T)
1	3641,43	85,38
2	1416,54	95,21

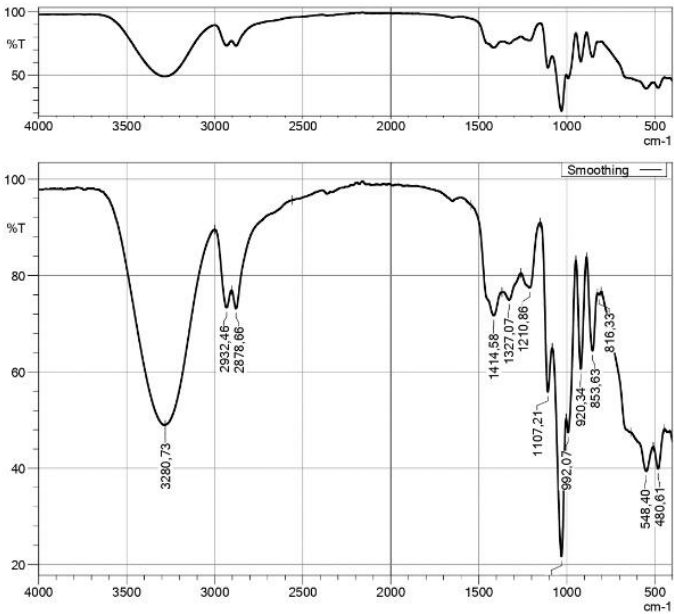
f. Gliserol

21/04/2025
12:15:26



System Administrator

Item	Value
Acquired Date&Time	24/01/2025 08:43:54
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\January\Aldia-2401\gliserol1.ispd
Measure Parameter File	
Spectrum name	Smoothing
Sample name	
Sample ID	
No. of Scans	21
Resolution	0.9 [cm-1]
Apodization	Happ-Genzel



13/06/2025
12:52:24



System Administrator

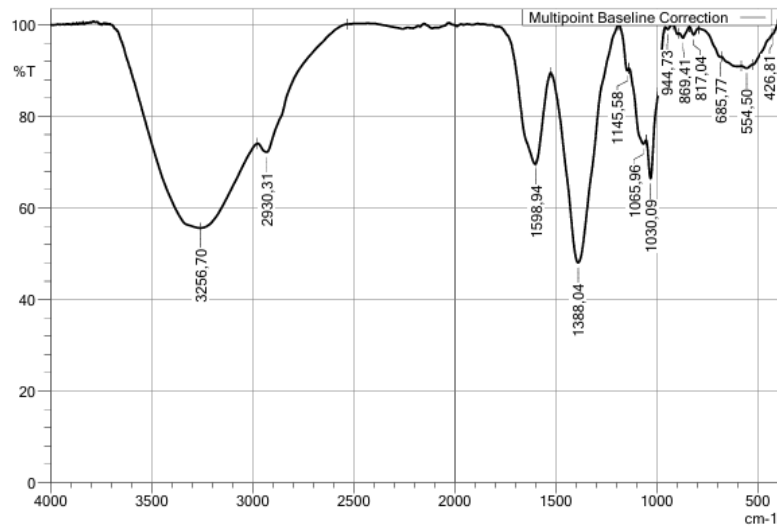
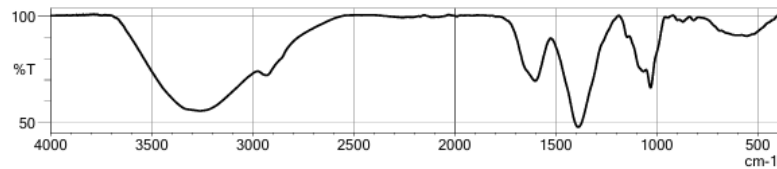
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	426,10	99,64	0,66	454,07	412,47	-0,522	14,116	
2	488,50	98,28	1,46	525,81	454,07	70,920	50,585	
3	578,89	98,18	0,18	587,50	548,04	59,939	3,101	
4	616,19	96,84	1,32	650,62	587,50	151,938	34,966	
5	677,16	97,74	0,21	692,94	650,62	89,748	4,094	
6	720,20	97,60	0,55	749,61	700,12	101,160	12,164	
7	814,89	94,05	5,72	842,87	749,61	271,186	216,020	
8	886,62	95,80	2,60	910,30	842,87	160,903	82,819	
9	944,73	92,50	2,79	966,25	910,30	323,438	81,741	
10	1025,79	69,38	18,34	1068,11	966,25	2059,802	900,961	
11	1083,17	82,45	2,77	1197,23	1068,11	1074,130	-6,524	
12	1298,37	90,72	3,22	1334,96	1197,23	762,271	194,578	
13	1406,69	80,21	14,28	1480,58	1334,96	1460,232	663,424	
14	1594,63	70,76	27,75	1725,19	1480,58	2542,016	2197,809	
15	2928,16	93,68	1,11	2967,61	2468,35	1473,738	45,092	
16	3257,41	87,62	0,49	3671,32	3241,63	3341,679	679,479	

g. Membran Ca 0 mg

09/05/2025
11:14:07

System Administrator

Item	Value
Acquired Date&Time	09/05/2025 11:05:26
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\MeiJesaya-0905\Ca0 (Before)1.ispd
Measure Parameter File	D:\Parameter Pengujian\interval 0.72.iscp
Spectrum name	Multipoint Baseline Correction
Sample name	Ca0 (Before)
Sample ID	
No. of Scans	25
Resolution	2 [cm-1]
Apodization	Happ-Genzel

09/05/2025
11:14:07

System Administrator

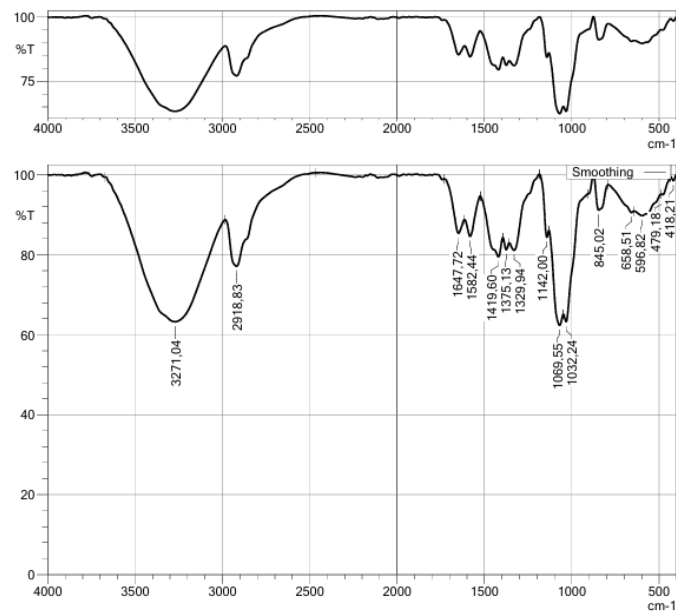
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	426.81	98.01	0.06	427.53	403.14	29.805	5.668	
2	554.50	90.55	0.62	581.04	526.52	499.663	18.417	
3	685.77	92.97	0.47	792.65	677.88	387.867	-57.304	
4	817.04	97.85	1.56	837.85	792.65	60.389	33.248	
5	869.41	97.17	1.55	889.49	837.85	96.354	38.212	
6	944.73	99.04	0.62	957.64	919.62	18.789	9.714	
7	1030.09	66.43	14.30	1053.05	957.64	1768.561	538.954	
8	1065.96	74.00	3.23	1136.26	1053.05	1651.347	206.153	
9	1145.58	90.01	2.19	1187.91	1136.26	263.712	18.938	
10	1388.04	48.02	45.79	1523.62	1187.91	8540.408	6801.163	
11	1598.94	69.57	0.40	1600.37	1523.62	1550.739	-15.757	
12	2930.31	72.21	4.53	2975.50	2532.19	5114.711	-593.799	
13	3256.70	55.60	0.05	3257.41	2975.50	10227.562	314.974	

h. Membran Ca 2,5 mg

09/05/2025
11:15:21

System Administrator

Item	Value
Acquired Date&Time	09/05/2025 11:10:23
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\Mei\Jesaya-0905\Ca25 (Before)1.ispd
Measure Parameter File	D:\Parameter Pengujian\interval 0.72.iscp
Spectrum name	Smoothing
Sample name	Ca25 (Before)
Sample ID	Ca25 (Before)
No. of Scans	25
Resolution	2 [cm-1]
Apodization	Happ-Genzel

09/05/2025
11:15:21

System Administrator

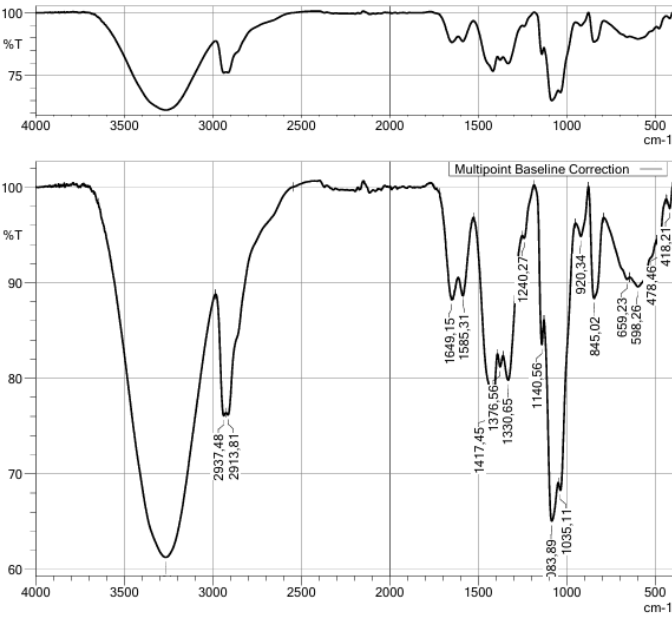
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	418,21	98,55	1,15	433,27	400,27	28,599	19,390	
2	479,18	95,03	0,87	488,50	433,27	171,654	22,725	
3	596,82	89,79	2,39	642,01	488,50	1306,579	239,835	
4	658,51	90,58	1,07	790,50	642,01	911,758	52,303	
5	845,02	91,19	8,06	875,86	790,50	481,179	384,884	
6	1032,24	63,27	5,20	1048,03	906,71	2520,216	281,567	
7	1069,55	62,37	8,21	1130,52	1048,03	2461,042	447,644	
8	1142,00	84,40	4,61	1185,75	1130,52	434,332	54,298	
9	1329,94	81,15	4,60	1357,91	1185,75	1545,138	91,317	
10	1375,13	81,27	2,32	1394,50	1357,91	641,478	42,507	
11	1419,60	79,52	6,78	1524,33	1394,50	1923,113	557,472	
12	1582,44	84,62	6,23	1614,00	1524,33	1013,166	271,019	
13	1647,72	85,38	6,35	1730,93	1614,00	990,699	275,802	
14	2918,83	77,14	13,09	2984,11	2468,35	3751,183	986,268	
15	3271,04	63,24	29,96	3672,03	2984,11	15580,463	11516,224	

i. Ca 5 mg

09/05/2025
11:18:09

System Administrator

Item	Value
Acquired Date&Time	09/05/2025 11:14:55
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\MeiJesaya-0905\Ca50 (Before)1.ispd
Measure Parameter File	D:\Parameter Pengujian\Interval 0.72.iscp
Spectrum name	Multipoint Baseline Correction
Sample name	Ca50 (Before)
Sample ID	Ca50 (Before)
No. of Scans	25
Resolution	2 (cm-1)
Apodization	Happ-Genzel



09/05/2025
11:18:09

System Administrator

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	418.21	97.75	1.62	434.70	403.14	50.204	29.453	
2	478.46	93.69	1.79	491.37	436.86	216.017	31.033	
3	598.26	89.57	2.15	642.73	491.37	1342.343	210.560	
4	659.23	90.35	0.92	789.78	642.73	996.694	68.377	
5	845.02	88.36	10.51	876.58	789.78	642.413	506.268	
6	920.34	94.85	2.91	949.75	876.58	264.607	128.196	
7	1035.11	68.28	4.21	1047.31	949.75	1748.956	56.739	
8	1083.89	65.07	11.70	1128.37	1047.31	2311.103	495.158	
9	1140.56	83.53	5.65	1184.32	1128.37	414.743	32.017	
10	1240.27	94.66	1.12	1251.03	1184.32	179.579	17.616	
11	1330.65	79.81	5.88	1359.35	1251.03	1509.635	279.295	
12	1376.56	81.20	1.26	1390.91	1359.35	573.425	19.469	
13	1417.45	76.78	8.58	1525.77	1390.91	2046.492	655.999	
14	1585.31	88.65	0.33	1587.46	1525.77	433.042	-13.365	
15	1649.15	88.22	2.19	1718.01	1636.24	575.645	89.875	
16	2913.81	76.16	0.89	2924.57	2543.67	2828.976	-1662.647	
17	2937.48	76.08	3.03	2983.39	2924.57	1083.646	59.412	
18	3266.02	61.28	31.58	3646.93	2983.39	16089.131	11818.854	

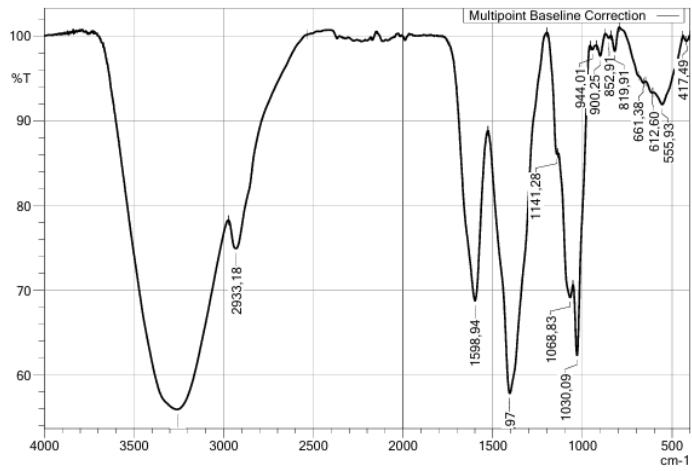
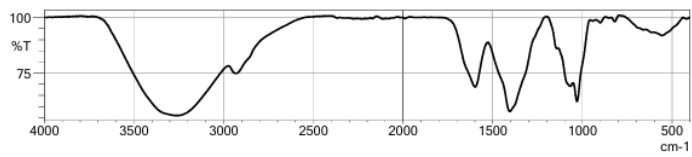
j. Ca 7,5 mg

09/05/2025
11:22:35



System Administrator

Item	Value
Acquired Date&Time	09/05/2025 11:19:17
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\Mei\Uesaya-0905\Ca75 (Before)1.ispd
Measure Parameter File	D:\Parameter Pengujian\interval 0.72.iscp
Spectrum name	Multipoint Baseline Correction
Sample name	Ca75 (Before)
Sample ID	Ca75 (Before)
No. of Scans	25
Resolution	2 [cm-1]
Apodization	Happ-Genzel



09/05/2025
11:22:35



System Administrator

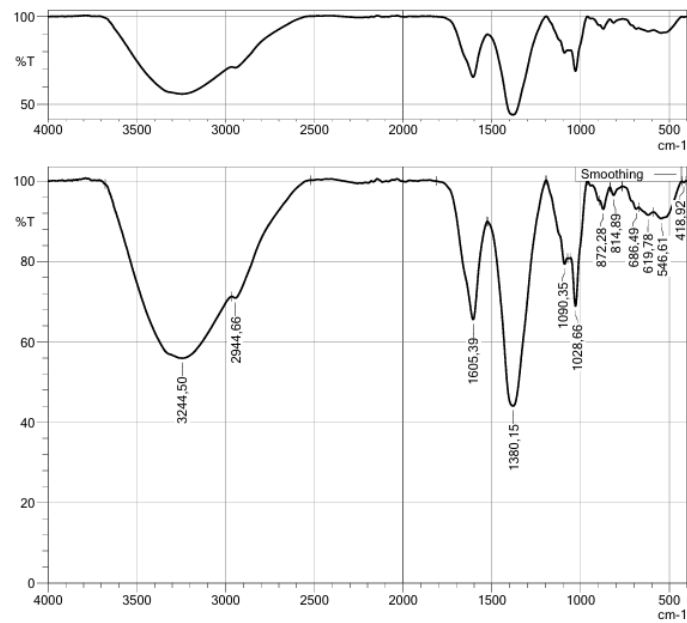
	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	417.49	99,37	0,17	420,36	403,14	6,755	2,002	
2	555,93	91,90	3,30	601,13	440,44	873,117	337,259	
3	612,60	93,28	0,15	647,75	609,02	236,619	3,019	
4	661,38	94,47	0,05	685,77	659,95	132,625	0,217	
5	819,91	98,20	2,29	840,72	794,09	24,361	49,531	
6	852,91	99,74	0,39	871,56	840,72	1,053	6,003	
7	900,25	97,62	1,86	921,77	871,56	63,269	42,041	
8	944,01	98,39	0,47	957,64	921,77	47,559	6,981	
9	1030,09	62,31	14,94	1052,33	957,64	2034,619	588,635	
10	1068,83	69,15	4,54	1135,54	1052,33	2028,424	229,698	
11	1141,28	86,05	1,42	1197,95	1135,54	398,691	-20,801	
12	1405,97	57,84	35,21	1525,77	1197,95	7175,224	5407,691	
13	1598,94	68,75	23,41	1735,95	1528,64	3706,717	2414,298	
14	2933,18	74,92	5,37	2974,07	2532,19	4589,575	-173,817	
15	3258,85	55,94	30,70	3668,45	2974,07	21269,960	13268,036	

k. Ca 10 mg

09/05/2025
11:28:12

System Administrator

Item	Value
Acquired Date&Time	09/05/2025 11:25:36
Acquired by	System Administrator
Filename	D:\2025\Mei\Jesaya-0905\Ca100 (Before)3.ispd
Measure Parameter File	D:\Parameter Pengujian\interval 0.72.iscp
Spectrum name	Smoothing
Sample name	Ca100 (Before)
Sample ID	Ca100 (Before)
No. of Scans	25
Resolution	2 [cm-1]
Apodization	Happ-Genzel

09/05/2025
11:28:12

System Administrator

	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area	Comment
1	418,92	99,70	0,31	429,68	405,29	3,877	4,048	
2	546,61	90,69	3,68	589,65	429,68	1039,952	424,294	
3	619,78	91,56	1,16	674,29	589,65	652,621	51,036	
4	686,49	93,07	1,12	763,96	674,29	367,936	17,184	
5	814,89	96,50	2,03	835,69	763,96	160,046	58,193	
6	872,28	93,01	3,36	893,08	835,69	269,458	87,192	
7	1028,66	68,91	17,66	1056,63	961,94	1583,468	681,535	
8	1090,35	79,37	4,20	1194,36	1073,13	1284,479	133,643	
9	1380,15	44,07	50,38	1525,77	1194,36	9359,485	7726,364	
10	1605,39	65,58	27,17	1811,99	1525,77	3974,244	2539,517	
11	2944,66	70,89	1,74	2965,46	2520,71	5373,411	-960,574	
12	3244,50	55,93	26,32	3677,77	2965,46	22367,229	11879,152	

Lampiran 3. Hasil Uji Berat dan Ketebalan Film

Jenis Membran	Berat (g)	Ketebalan (mm)
Ca 0 mg	0,132	0,051
Ca 2,5 mg	0,136	0,053
Ca 5 mg	0,15	0,058
Ca 7,5 mg	0,199	0,062
Ca 10 mg	0,257	0,074
Konvensional	0,062	0,025

Uji Berat

Jenis Membran	W ₁ (gram)	W ₂ (gram)	W ₃ (gram)	W (gram)
Ca 0 mg	0,132	0,133	0,131	0,132
Ca 2,5 mg	0,137	0,135	0,136	0,136
Ca 5 mg	0,150	0,149	0,151	0,15
Ca 7,5 mg	0,200	0,198	0,199	0,199
Ca 10 mg	0,257	0,256	0,258	0,257
Konvensional	0,062	0,063	0,061	0,062

Uji Ketebalan

Jenis Membran	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b (mm)
Ca 0 mg	0,05	0,051	0,052	0,051
Ca 2,5 mg	0,053	0,052	0,054	0,053
Ca 5 mg	0,058	0,057	0,059	0,058
Ca 7,5 mg	0,063	0,062	0,061	0,062
Ca 10 mg	0,075	0,073	0,074	0,074
Konvensional	0,025	0,024	0,026	0,025

Lampiran 4. Uji Hidrofilisitas Membran

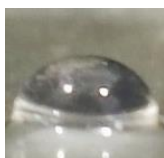
Jenis Membran	Sudut Kiri	Sudut Kanan	Rata - rata	Hasil
Ca 0 mg	80,6	82,5	81,55	98,45
Ca 2,5 mg	82,9	83,7	83,3	96,7
Ca 5 mg	93,5	91,2	92,35	87,65
Ca 7,5 mg	105	90,5	97,75	82,25
Ca 10 mg	104,07	102,5	103,285	76,715
Konvensional	119	123	121	59



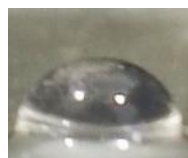
Ca 0 mg



Ca 2,5 mg



Ca 5 mg



Ca 7,5 mg



Ca 10 mg



Konvensional

Lampiran 5. Hasil Uji Serapan Uap Air

Jenis Membran	Berat Awal	Berat						Hasil (%)
		1 jam	2 jam	3 jam	4 jam	5 jam	6 jam	
Ca 0 mg	0,135	0,169	0,166	0,167	0,170	0,166	0,159	23,09
Ca 2,5 mg	0,137	0,165	0,164	0,163	0,166	0,160	0,164	19,46
Ca 5 mg	0,150	0,175	0,173	0,176	0,178	0,170	0,173	16,11
Ca 7,5 mg	0,200	0,226	0,225	0,224	0,228	0,220	0,231	12,83
Ca 10 mg	0,257	0,287	0,285	0,286	0,283	0,288	0,278	10,70
Konvensional	0,062	0,062	0,061	0,063	0,062	0,061	0,063	0,00

Lampiran 6. Hasil Uji Pengembangan (*Swelling*)

Jenis Membran	$I_t(\text{cm})$	$I_0(\text{cm})$	Pengembangan (%)
Ca 0 mg	16,66	12	138,83
Ca 2,5 mg	15,84	12	132,00
Ca 5 mg	14,49	12	120,75
Ca 7,5 mg	14,08	12	117,33
Ca 10 mg	13,818	12	115,15
Konvensional	13,459	12	112,16

Lampiran 7. Hasil Uji *Water Vapour Transmission Rate* (WVTR)

Jenis Membran	Berat	A	Waktu	Total A	Hasil (gr/m ² /h)
Ca 0 mg	4,597	1,2469	24	29,9256	0,00640
Ca 2,5 mg	3,6265	1,2469	24	29,9256	0,00505
Ca 5 mg	2,834	1,2469	24	29,9256	0,00395
Ca 7,5 mg	2,226	1,2469	24	29,9256	0,00310
Ca 10 mg	2,042	1,2469	24	29,9256	0,00284
Konvensional	1,942	1,2469	24	29,9256	0,00270

Lampiran 8. Hasil Uji Porositas

Jenis Membran	W0(gr)	wi(gr)	A (cm)	b (cm)	v (cm)	(pw(g/Nn))	Hasil (%)
Ca 0 mg	0,533	0,225	21	0,05	1,05	1	29,33
Ca 2,5 mg	0,490	0,200	21	0,053	1,113	1	26,06
Ca 5 mg	0,381	0,149	21	0,048	1,008	1	23,02
Ca 7,5 mg	0,394	0,137	21	0,063	1,323	1	19,43
Ca 10 mg	0,415	0,135	21	0,075	1,575	1	17,78
Konvensional	0,063	0,061	21	0,025	0,525	1	0,381