



**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI PELAPIS KITOSAN-PVA-*BEE*SWAX
TERHADAP KINERJA *BARRIER*, SIFAT MEKANIK, DAN
BIODEGRADABILITAS KERTAS KRAFT**

SKRIPSI

Oleh:

Nur Cahyo Dwi Arvianto

NIM 221910101037

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN**

JEMBER

2026



**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI PELAPIS KITOSAN–PVA–*BEESWAX*
TERHADAP KINERJA *BARRIER*, SIFAT MEKANIK, DAN
BIODEGRADABILITAS KERTAS KRAFT**

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
Program studi Strata 1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember*

SKRIPSI

Oleh:

Nur Cahyo Dwi Arvianto

NIM 221910101037

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN**

JEMBER

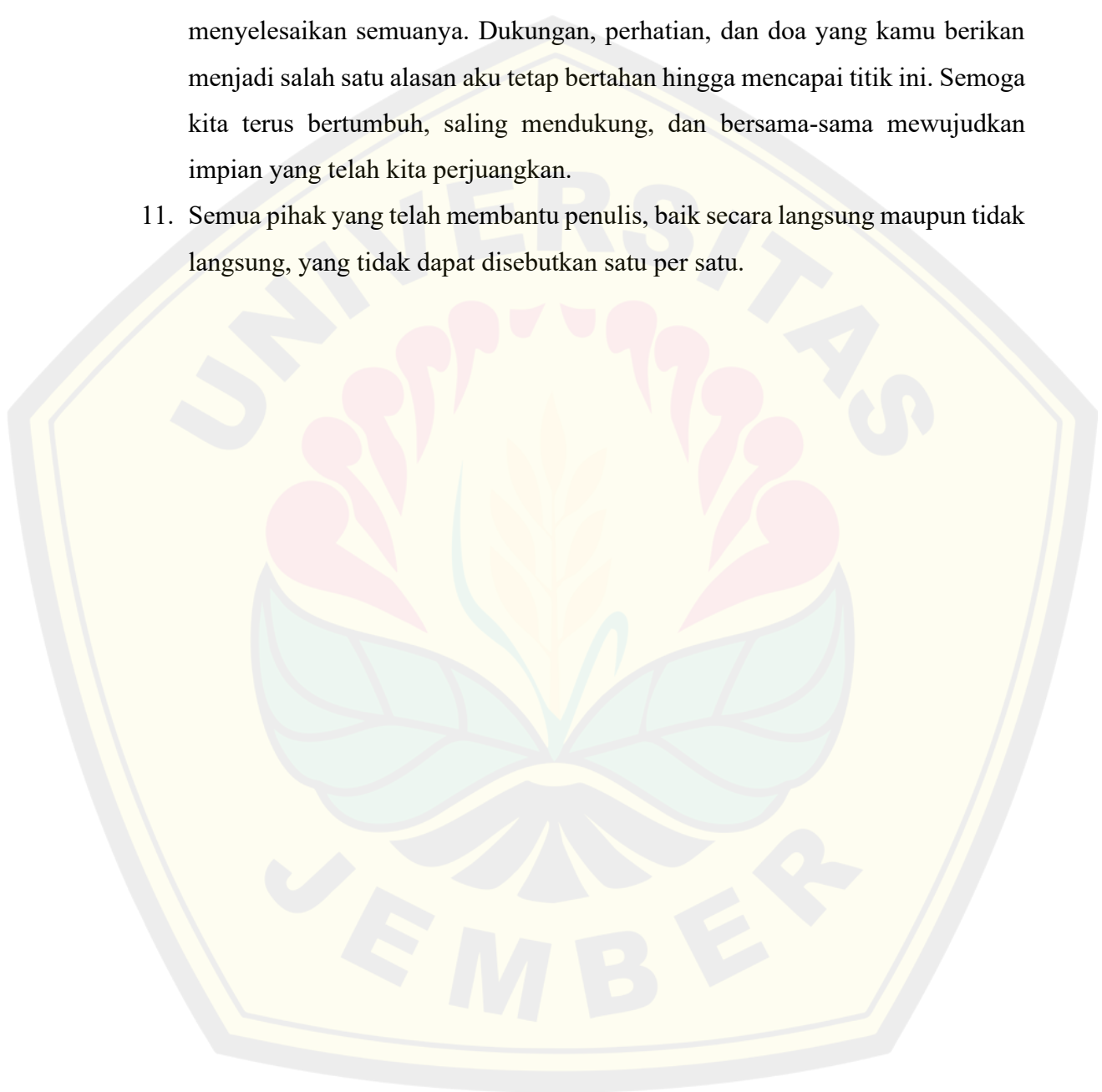
2026

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur terhadap Allah SWT, dan dengan segala kerendahan hati saya, skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Allah SWT, yang senantiasa melimpahkan rahmat, hidayah, kesehatan, serta kekuatan lahir dan batin sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Samingun dan Ibu Sudarti, terimakasih banyak karena sudah menjadi motivasi penulis untuk terus berjalan, pasti doamu yang lancarkan upayaku, mesti doa yang keluar dari bibirmu, dan yang aku tahu kau tak kan pernah berhenti, tumbuhku kini semoga sesuai yang engkau impi, tertulis jelas namaku disetiap harap malammu.
3. Kakak penulis, Pramesthi Sukma Windratih S.T., yang selalu memberikan semangat, nasihat, dan dukungan dalam setiap proses yang penulis lalui.
4. Seluruh dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, serta bimbingan selama masa perkuliahan sehingga penulis dapat berkembang hingga saat ini.
5. Dosen Pembimbing Akademik, Ir. Hary Sutjahjono S.T., M.T., yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta dukungan akademik kepada penulis selama menjalani proses studi.
6. Dosen Pembimbing Skripsi, Ir. Rahma Rei Sakura, S.T., M.T., yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, motivasi, masukan, dan arahan selama proses penyusunan skripsi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Dosen Penguji saya, Imam Sholahuddin S.T., M.T. dan Ir.Dedi Dwilaksana S.T., M.T. yang selalu memberikan saran dan arahan yang membangun dan memotivasi kepada penulis sehingga skripsi dapat terselesaikan dengan baik.
8. Teman-teman seperjuangan, yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kebersamaan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.

9. Almamater tercinta, Universitas Jember, yang telah menjadi tempat penulis menimba ilmu, mengembangkan potensi, dan meraih pengalaman yang sangat berharga.
10. Terima kasih kepada Leni Eka Sefia, yang telah menemani setiap proses, memberi semangat di saat lelah, dan selalu percaya bahwa aku mampu menyelesaikan semuanya. Dukungan, perhatian, dan doa yang kamu berikan menjadi salah satu alasan aku tetap bertahan hingga mencapai titik ini. Semoga kita terus bertumbuh, saling mendukung, dan bersama-sama mewujudkan impian yang telah kita perjuangkan.
11. Semua pihak yang telah membantu penulis, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.



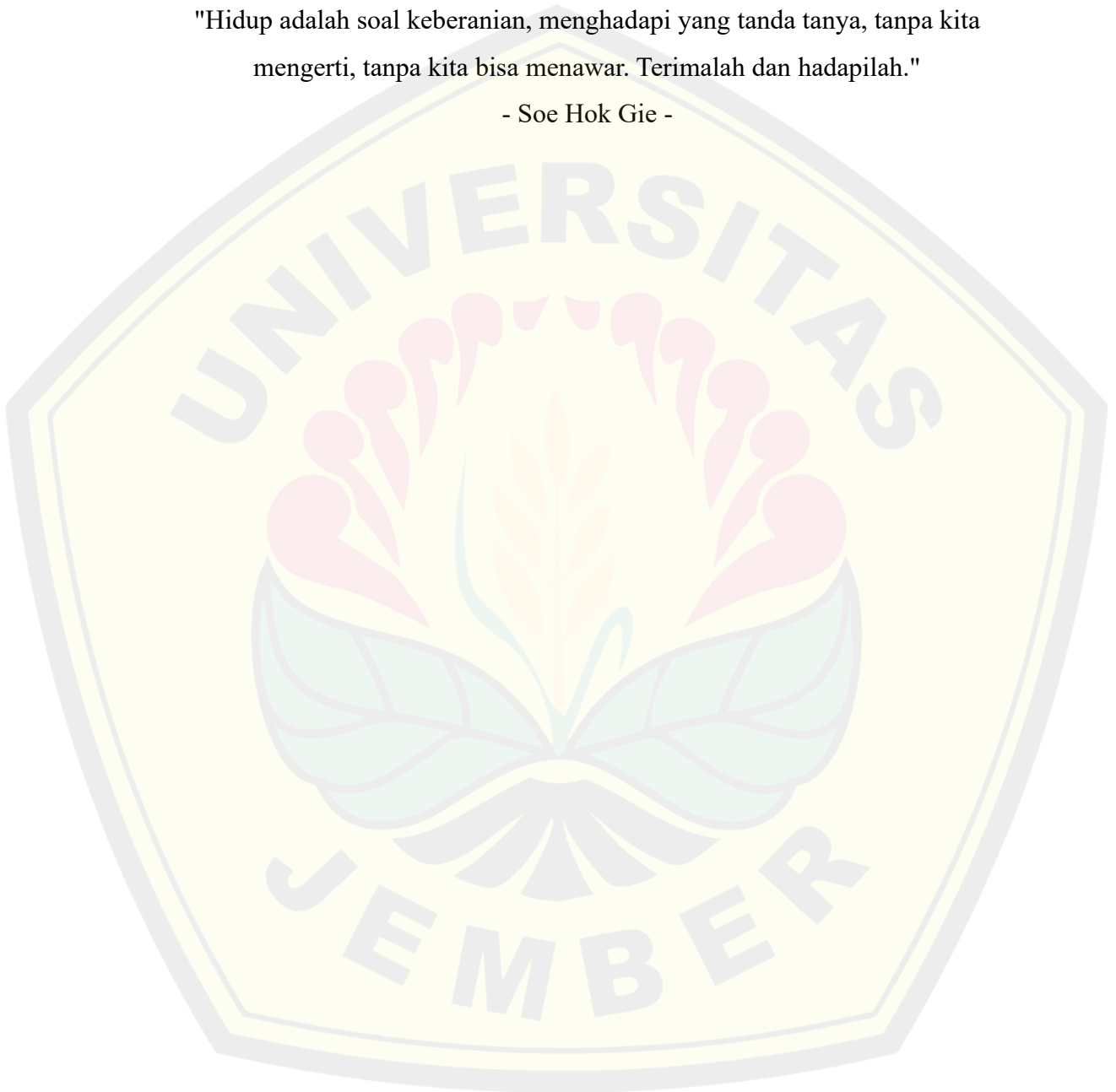
MOTTO

"I'am not the person I want to be yet, but far from the person I was "

- Nur Cahyo Dwi Arvianto -

"Hidup adalah soal keberanian, menghadapi yang tanda tanya, tanpa kita mengerti, tanpa kita bisa menawar. Terimalah dan hadapilah."

- Soe Hok Gie -



PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan disini :

Nama : Nur Cahyo Dwi Arvianto

NIM : 221910101037

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: PENGARUH VARIASI KOMPOSISI PELAPIS KITOSAN-PVA-BEESWAX TERHADAP KINERJA *BARRIER*, SIFAT MEKANIK, DAN BIODEGRADABILITAS KERTAS KRAFT

adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 30 Juni 2026

Yang menyatakan,

Nur Cahyo Dwi Arvianto

NIM. 221910101037

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi berjudul “PENGARUH VARIASI KOMPOSISI PELAPIS KITOSAN–PVA–*BEESWAX* TERHADAP KINERJA *BARRIER*, SIFAT MEKANIK, DAN BIODEGRADABILITAS KERTAS KRAFT” telah diuji dan disahkan pada :

Hari : Selasa
Tanggal : 30 Juni 2026
Tempat : Ruangg Rapat IsDB lantai 3, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Pembimbing Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Ir. Rahma Rei Sakura.,S.T.,M.T. (.....)

NIP : 199102282022032003

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Imam Sholahuddin S.T., M.T. (.....)

NIP : 198110292008121003

2. Penguji Anggota

Nama : Ir.Dedi Dwilaksana S.T., M.T. (.....)

NIP : 196912011996021001

ABSTRAK

Permasalahan limbah plastik pada kemasan berbasis kertas mendorong pengembangan pelapis ramah lingkungan dan *biodegradable* sebagai alternatif pengganti polimer sintetik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan *beeswax* pada pelapis berbasis kitosan dan *polyvinyl alcohol* (PVA) terhadap sifat *barrier*, sifat mekanik, *biodegradability*, dan morfologi permukaan kertas kraft. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan lima variasi komposisi pelapis, yaitu KIT1/PVA (70:30:0), KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), KIT4/PVA/BW3 (55:30:15), dan KIT5/PVA/BW4 (50:30:20). Karakterisasi dilakukan melalui pengujian Cobb₆₀, *Kit Rating*, uji tarik, *soil burial test*, serta pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan komposisi pelapis berupa peningkatan kadar *beeswax* yang diikuti penurunan kadar kitosan meningkatkan sifat *barrier* terhadap air dan minyak. Nilai Cobb₆₀ menurun dari 81 menjadi 26,67 g/m², sedangkan nilai *Kit Rating* meningkat dari 7,34 menjadi 10,67. Sebaliknya, perubahan komposisi tersebut menurunkan sifat mekanik, ditunjukkan oleh penurunan kekuatan tarik dari 11,93 menjadi 5,02 MPa, elongasi dari 5,46% menjadi 2,60%, dan modulus elastisitas dari 717,50 menjadi 254,61 MPa. Seluruh sampel tetap bersifat *biodegradable*, meskipun laju degradasinya menurun seiring meningkatnya kandungan *beeswax*. Hasil SEM memperlihatkan lapisan pelapis yang semakin rapat dan homogen dengan bertambahnya konsentrasi *beeswax*.

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, formulasi KIT3/PVA/BW2 (60:30:10) merupakan komposisi optimum karena memberikan keseimbangan terbaik antara sifat *barrier*, sifat mekanik, dan *biodegradability*. Formulasi ini berpotensi dikembangkan sebagai pelapis *biodegradable* untuk kemasan berbasis kertas yang ramah lingkungan.

Kata kunci: *beeswax*, kitosan, PVA, kertas kraft, *biodegradable*, sifat *barrier*.

ABSTRACT

Plastic waste generated from paper-based packaging has driven the development of environmentally friendly and biodegradable coating materials as alternatives to conventional synthetic polymer coatings. This study aimed to investigate the effect of beeswax addition to chitosan/polyvinyl alcohol (PVA)-based coatings on the barrier properties, mechanical properties, biodegradability, and surface morphology of kraft paper. An experimental method was employed using five coating formulations: KIT1/PVA (70:30:0), KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), KIT4/PVA/BW3 (55:30:15), and KIT5/PVA/BW4 (50:30:20). The coated samples were characterized using the Cobb₆₀ water absorption test, Kit Rating test, tensile test, soil burial biodegradation test, and surface morphology analysis by Scanning Electron Microscopy (SEM).

The results showed that increasing the beeswax content while simultaneously reducing the chitosan content significantly improved the barrier performance against water and oil. The Cobb₆₀ value decreased from 81 to 26.67 g/m², while the Kit Rating increased from 7.34 to 10.67. However, the compositional change reduced the mechanical properties, as indicated by decreases in tensile strength from 11.93 to 5.02 MPa, elongation at break from 5.46% to 2.60%, and Young's modulus from 717.50 to 254.61 MPa. All coated samples remained biodegradable, although the biodegradation rate decreased with increasing beeswax content. SEM observations revealed the formation of a denser and more homogeneous coating layer as the beeswax concentration increased.

Overall, the KIT3/PVA/BW2 formulation (60:30:10) exhibited the optimum performance by providing the best balance between barrier properties, mechanical properties, and biodegradability. Therefore, this formulation shows strong potential as a biodegradable coating material for environmentally friendly paper-based food packaging applications.

Keywords: *beeswax, chitosan, polyvinyl alcohol, kraft paper, biodegradable, barrier properties.*

RINGKASAN

"Pengaruh Variasi Komposisi Pelapis Kitosan–Pva–Beeswax Terhadap Kinerja *Barrier*, Sifat Mekanik, Dan Biodegradabilitas Kertas Kraft"

Nur Cahyo Dwi Arvianto., 221910101037; 56 Halaman, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh penggunaan pelapis plastik pada kemasan berbasis kertas yang sulit terurai sehingga menimbulkan permasalahan lingkungan. Salah satu alternatif yang dapat dikembangkan adalah pelapis *biodegradable* berbasis kitosan, polyvinyl alcohol (PVA), dan beeswax. Kombinasi ketiga bahan tersebut diharapkan mampu meningkatkan ketahanan kertas terhadap air dan minyak tanpa mengurangi sifat ramah lingkungannya.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan beeswax pada pelapis berbasis kitosan dan PVA terhadap karakteristik kertas kraft. Pelapis dibuat dengan lima variasi komposisi, yaitu KIT1/PVA (70:30:0), KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), KIT4/PVA/BW3 (55:30:15), dan KIT5/PVA/BW4 (50:30:20). Karakterisasi dilakukan melalui pengujian Cobb₆₀, Kit Rating, uji tarik, biodegradabilitas metode soil burial, dan analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan komposisi dengan meningkatkan beeswax dan mengurangi kitosan meningkatkan sifat *barrier* terhadap air dan minyak yang ditandai dengan penurunan nilai Cobb₆₀ dan peningkatan nilai Kit Rating. Sebaliknya, peningkatan kadar beeswax menurunkan sifat mekanik serta laju biodegradasi. Pengamatan SEM menunjukkan lapisan pelapis menjadi lebih rapat dan homogen. Berdasarkan hasil penelitian, formulasi KIT3/PVA/BW2 (60:30:10) memberikan keseimbangan terbaik antara sifat *barrier*, sifat mekanik, dan biodegradabilitas sehingga berpotensi digunakan sebagai pelapis *biodegradable* pada kemasan berbasis kertas.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pengaruh Variasi Komposisi Pelapis Kitosan-Pva-*Beeswax* Terhadap Kinerja *Barrier*, Sifat Mekanik, Dan Biodegradabilitas Kertas Kraft". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis memperoleh banyak bantuan, bimbingan, doa, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, yang senantiasa melimpahkan rahmat, hidayah, kesehatan, serta kekuatan lahir dan batin sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Samingun dan Ibu Sudarti, terimakasih banyak karena sudah menjadi motivasi penulis untuk terus berjalan, pasti doamu yang lancarkan upayaku, mesti doa yang keluar dari bibirmu, dan yang aku tahu kau tak kan pernah berhenti, tumbuhku kini semoga sesuai yang engkau impi, tertulis jelas namaku disetiap harap malammu.
3. Kakak penulis, Pramesthi Sukma Windrati S.T., yang selalu memberikan semangat, nasihat, dan dukungan dalam setiap proses yang penulis lalui.
4. Seluruh dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, serta bimbingan selama masa perkuliahan sehingga penulis dapat berkembang hingga saat ini.
5. Dosen Pembimbing Akademik, Ir. Hary Sutjahjono S.T., M.T., yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta dukungan akademik kepada penulis selama menjalani proses studi.
6. Dosen Pembimbing Skripsi, Ir. Rahma Rei Sakura, S.T., M.T., yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, motivasi, masukan, dan

arahan selama proses penyusunan skripsi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

7. Dosen Penguji saya, Imam Sholahuddin S.T., M.T. dan Ir.Dedi Dwilaksana S.T., M.T. yang selalu memberikan saran dan arahan yang membangun dan memotivasi kepada penulis sehingga skripsi dapat terselesaikan dengan baik.
8. Teman-teman seperjuangan, yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kebersamaan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
9. Almamater tercinta, Universitas Jember, yang telah menjadi tempat penulis menimba ilmu, mengembangkan potensi, dan meraih pengalaman yang sangat berharga.
10. Terima kasih kepada Leni Eka Sefia, yang telah menemani setiap proses, memberi semangat di saat lelah, dan selalu percaya bahwa aku mampu menyelesaikan semuanya. Dukungan, perhatian, dan doa yang kamu berikan menjadi salah satu alasan aku tetap bertahan hingga mencapai titik ini. Semoga kita terus bertumbuh, saling mendukung, dan bersama-sama mewujudkan impian yang telah kita perjuangkan.
11. Semua pihak yang telah membantu penulis, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan karya ini. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi referensi dalam pengembangan material kemasan ramah lingkungan berbasis biopolimer.

Jember, 30 Juni 2026

Nur Cahyo Dwi Arvianto

221910101037

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
LEMBAR PENGESAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
RINGKASAN	ix
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR NOTASI	xvii
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xviii
 BAB 1. PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Manfaat	3
1.3.1 Tujuan	3
1.3.2 Manfaat	4
1.4 Batasan Masalah	4
 BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1 Penelitian Terdahulu Terkait Pelapis Biodegradable Berbasis Kitosan–PVA–Beeswax	5
2.2 Kertas Laminasi: Karakteristik dan Kriteria Mutu SNI.....	6
2.2.1 Kertas Dasar (<i>Base Paper</i>) dan Spesifikasi Mutu SNI	6
2.2.2 Kriteria Kinerja <i>Barrier</i> Tahan Minyak dan Keseimbangan Mutu	7
2.3 Komponen Pelapis: Kitosan, PVA, dan Beeswax (Lilin Lebah) .	7
2.3.1 Kitosan	7
2.3.2 Polivinil Alkohol (Polyvinyl Alcohol / PVA)	8
2.3.3 <i>Beeswax</i> (Lilin Lebah)	9
2.4 Formulasi Pelapis dan Metode Aplikasi	10
2.5 Landasan Teori Pengujian	10
2.5.1 Daya Serap Air (<i>Water Absorption</i>)	10
2.5.2 Ketahanan Minyak (<i>Oil/Grease Resistance</i>).....	11
2.5.3 Kekuatan Tarik dan Elongasi Putus	11
2.5.4 Uji Biodegradabilitas	12
2.6 Hipotesis.....	12

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Metode Penelitian	13
3.2 Waktu dan Tempat.....	13
3.3 Variabel Penelitian.....	13
3.4 Alat dan Bahan.....	14
3.4.1 Alat.....	14
3.4.2 Bahan	14
3.5 Prosedur Penelitian.....	14
3.5.1 Pembuatan Larutan Pelapis.....	14
3.5.2 Proses Pelapisan pada Kertas Kraft	14
3.5.3 Pengujian Sampel.....	15
3.5.4 Analisis Data	15
3.6 Diagram Alir.....	16
 BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	 17
4.1 Hasil Pelapisan Kertas Kraft	17
4.1.1 Spesimen Uji Daya Serap Air ($Cobb_{60}$).....	17
4.1.2 Spesimen Uji Ketahanan Minyak (<i>Kit Rating</i>)	18
4.1.3 Spesimen Uji Kekuatan Tarik dan Elongasi.....	19
4.1.4 Spesimen Uji Biodegradabilitas.....	20
4.2 Hasil Uji Daya Serap Air ($Cobb_{60}$)	20
4.3 Uji Ketahanan Minyak (<i>Kit Rating</i>)	22
4.4 Hasil Uji Tarik (<i>Tensile Strength</i>)	24
4.4.1 Kekuatan Tarik	25
4.4.2 Elongasi.....	26
4.4.3 Modulus Elastisitas	28
4.5 Hasil Uji Biodegradabilitas	29
4.6 Hasil Uji Morfologi (SEM).....	31
4.6.1 Morfologi Permukaan	32
4.6.2 Morfologi <i>Cross-Section</i>	33
4.7 Analisis Keseluruhan Hasil Pengujian.....	35
 BAB 5. PENUTUP.....	 38
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran.....	39
 DAFTAR PUSTAKA.....	 40
LAMPIRAN.....	44

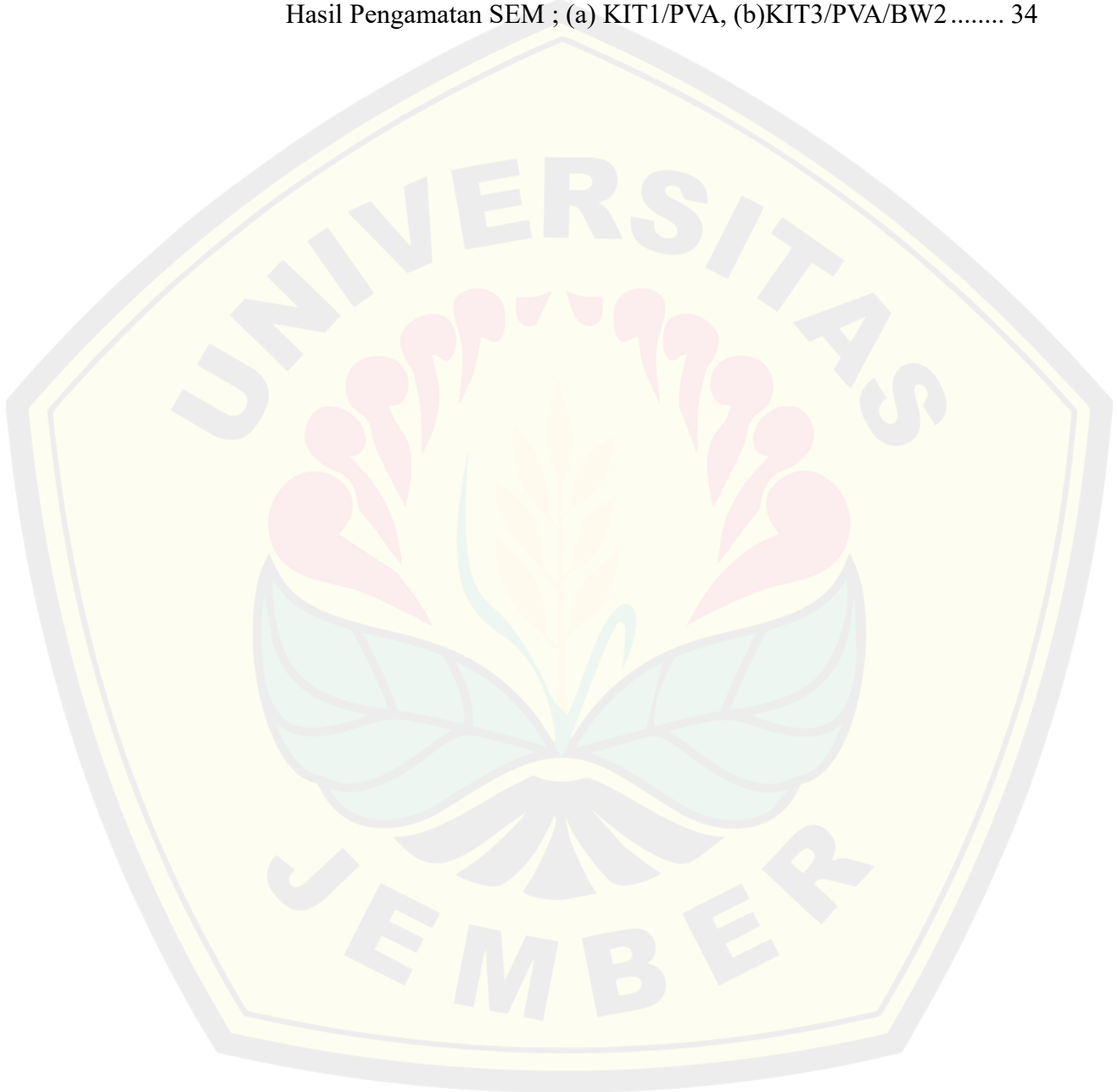
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Efektivitas pelapisan beeswax pada kertas yang meningkatkan hidrofobisitas dan menurunkan WVP/WVTR (Jahangiri et al., 2025).	5
Gambar 2. 3 a). Sumber kitin; b). Proses deasetilasi kitin menjadi kitosan; c).Aplikasi kitosan pada berbagai bidang (Gopi et al., 2020).....	7
Gambar 2. 4 a) Polivinil alkohol (PVA), b) struktur rantai PVA	8
Gambar 2. 6 a) struktur kimia; b) komposisi beeswax ; c) mekanisme hidrofobik beeswax (Chaireh et al., 2020; Jahangiri et al., 2025)	9
Gambar 2. 8 Cobb Test (a) Gelang logam, (b) Pelat logam, (c) Alat penjepit, (d) Bantalan karet (SNI 0499-2008, n.d.).....	10
Gambar 3. 4 Diagram Alir Penelitian.....	16
Gambar 4. 1 Visual permukaan kertas kraft (a) sebelum pelapisan, (b) setelah pelapisan	17
Gambar 4. 2 Spesimen Uji Cobb Test ; (a)KIT1/PVA, (b)KIT2/PVA/BW1, (c)KIT3/PVA/BW2, (d)KIT4/PVA/BW3, (e)KIT5/PVA/BW4	18
Gambar 4. 3 spesimen Kit Test; (a)KIT1/PVA, (b)KIT2/PVA/BW1, (c)KIT3/PVA/BW2, (d)KIT4/PVA/BW3, (e)KIT5/PVA/BW4	19
Gambar 4. 4 Spesimen Uji Kekuatan Tarik dan Elongasi; (a)KIT1/PVA, (b)KIT2/PVA/BW1, (c)KIT3/PVA/BW2, (d)KIT4/PVA/BW3, (e)KIT5/PVA/BW4	20
Gambar 4. 5 Spesimen Uji Biodegradabilitas pada variasi: (a) KIT1/PVA, (b) KIT2/PVA, (c) KIT3/PVA, (d) KIT4/PVA/BW2, dan (e) KIT5/PVA/BW4.....	20
Gambar 4. 6 hubungan variasi komposisi terhadap nilai Cobb ₆₀	21
Gambar 4. 7 Grafik hubungan variasi komposisi terhadap nilai Kit Rating.....	23
Gambar 4. 8 Grafik Hubungan Variasi Komposisi dengan Kekuatan Tarik	25
Gambar 4. 9 Grafik hubungan variasi komposisi terhadap nilai elongasi	27
Gambar 4. 10 Grafik hubungan variasi komposisi terhadap nilai Modulus Elastisitas	28

Gambar 4. 11 Hasil Uji Biodegradasi Kertas Kraft Terlapis Kitosan–PVA–Beeswax
..... 30

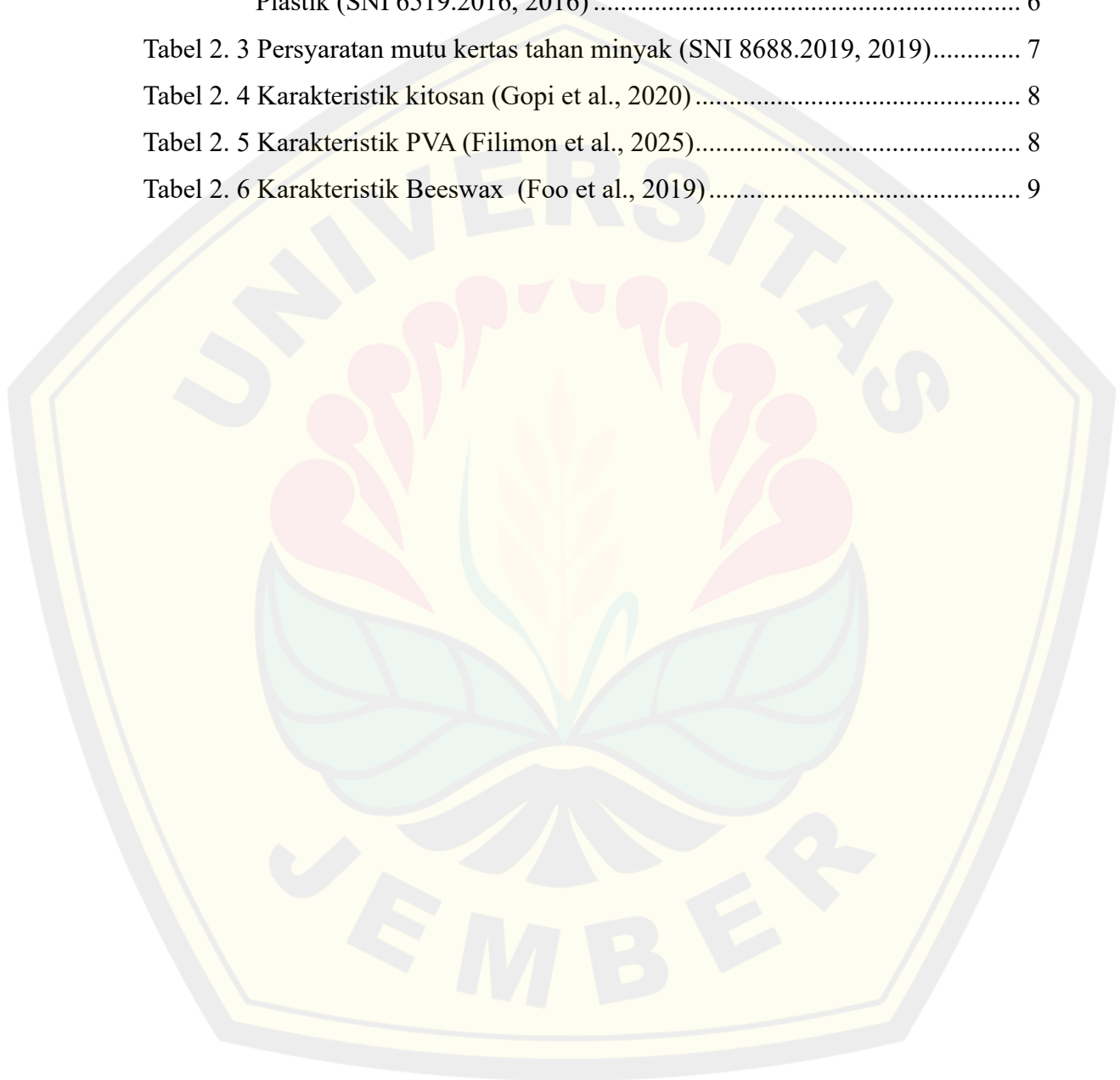
Gambar 4. 12 Morfologi Permukaan Kertas Kraft Terlapis Kitosan–PVA–Beeswax
Hasil Pengamatan SEM ; (a) KIT1/PVA, (b)KIT3/PVA/BW2 32

Gambar 4. 13 Morfologi Penampang Kertas Kraft Terlapis Kitosan–PVA–Beeswax
Hasil Pengamatan SEM ; (a) KIT1/PVA, (b)KIT3/PVA/BW2 34



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tinjauan Penelitian Terdahulu Terkait Material Kitosan–PVA–Beeswax dan Aplikasi Pelapisan Kertas	6
Tabel 2. 2 Persyaratan Mutu Kertas Dasar untuk Kertas Bungkus Berlaminsi Plastik (SNI 6519.2016, 2016)	6
Tabel 2. 3 Persyaratan mutu kertas tahan minyak (SNI 8688.2019, 2019).....	7
Tabel 2. 4 Karakteristik kitosan (Gopi et al., 2020)	8
Tabel 2. 5 Karakteristik PVA (Filimon et al., 2025).....	8
Tabel 2. 6 Karakteristik Beeswax (Foo et al., 2019).....	9



DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan
F	Gaya tarik maksimum
A	Luas penampang awal spesimen
σ	Kekuatan tarik (<i>Tensile Strength</i>)
ε	Regangan (<i>Elongation</i>)
E	Modulus elastisitas (<i>Young's Modulus</i>)
L_0	Panjang awal spesimen
L	Panjang akhir spesimen
m_0	Massa awal sampel
m_t	Massa sampel setelah biodegradasi
BW	Konsentrasi <i>beeswax</i>
KIT	Konsentrasi kitosan
PVA	Konsentrasi <i>Polyvinyl Alcohol</i>

DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

Notasi	Keterangan
<i>Barrier</i>	Kemampuan material menghambat penetrasi air, minyak, maupun gas.
<i>Biodegradabilitas</i>	Kemampuan suatu material terurai secara alami oleh aktivitas mikroorganisme.
<i>Coating</i>	Proses pelapisan permukaan material menggunakan bahan tertentu untuk meningkatkan sifat fungsional.
<i>Film</i>	Lapisan tipis yang terbentuk dari material polimer pada permukaan substrat.
<i>Hidrofobik</i>	Sifat material yang menolak atau sulit menyerap air.
<i>Hidrofilik</i>	Sifat material yang mudah berinteraksi atau menyerap air.
<i>Kraft paper</i>	Kertas berkekuatan tinggi yang dibuat melalui proses kraft dan banyak digunakan sebagai bahan kemasan.
<i>Soil Burial</i>	Metode pengujian biodegradasi dengan mengubur sampel di dalam tanah selama periode tertentu.
<i>Tensile Strength</i>	Kemampuan material menahan beban tarik sebelum mengalami kerusakan.
<i>Elongation</i>	Persentase pertambahan panjang material sebelum putus akibat gaya tarik.

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan limbah plastik telah menjadi isu global yang terus meningkat. Menurut OECD (2022), produksi plastik dunia telah mencapai lebih dari 400 juta ton per tahun, dengan sekitar 40% di antaranya digunakan untuk produk sekali pakai seperti kemasan makanan. Polimer sintetik seperti *polyethylene (PE)* dan *polypropylene (PP)* banyak digunakan sebagai pelapis kertas minyak untuk meningkatkan ketahanan air dan minyak. Namun, bahan tersebut bersifat *non-biodegradable* dan dapat menghasilkan mikroplastik ketika terfragmentasi di lingkungan (Sharma & Chatterjee, 2017). Mikroplastik yang berukuran kurang dari 5 mm berpotensi mencemari tanah, air, bahkan rantai makanan manusia (Prata et al., 2020).

Selain menyebabkan pencemaran lingkungan, pelapis plastik pada kertas minyak, seperti polietilen (PE) atau polipropilen (PP), sangat menghambat proses daur ulang. Lapisan polimer ini melekat kuat pada serat selulosa, sehingga tidak dapat terpisah sempurna selama proses *repulping*. Akibatnya, kualitas *pulp* daur ulang menurun dan residu plastik mencemari limbah industri (Al-Gharrawi et al., 2021). Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan pelapis alternatif yang ramah lingkungan dan *biodegradable* untuk menggantikan plastik guna mendukung sirkularitas material.

Kitosan adalah biopolimer alami yang menjanjikan dari limbah krustasea, menawarkan sifat *film-forming* dan antimikroba (Tanpichai et al., 2020), namun sifatnya yang hidrofilik membatasi fungsinya sebagai penghalang air. Untuk mengatasi kelemahan ini, riset terbaru berhasil menerapkan modifikasi hidrofobik pada kitosan, sering kali dengan mengkombinasikannya bersama asam palmitat atau lilin nabati. Misalnya, *beeswax* digunakan sebagai komponen hidrofobik yang efektif karena rantai alifatik panjangnya mampu meningkatkan ketahanan terhadap uap air dan minyak pada substrat kertas secara signifikan (Jahangiri et al., 2025). Selain itu, kitosan sering dikombinasikan dengan Polivinil Alkohol (PVA), polimer larut air yang kompatibel, guna memperbaiki sifat mekanik lapisan dan daya

lekatnya, karena PVA dapat meningkatkan kekuatan tarik dan perpanjangan putus lapisan komposit (Zatalini et al., 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi kitosan–PVA–*beeswax* dapat menghasilkan pelapis *biodegradable* dengan sifat penghalang (*barrier properties*) yang sangat baik. Sultan et al., (2021), misalnya, melaporkan bahwa film komposit kitosan–*beeswax* menunjukkan peningkatan signifikan pada *water contact angle*, yang mengindikasikan peningkatan ketahanan terhadap kelembaban. Lebih lanjut, potensi ini didukung oleh temuan Yolanda et al., (2021), yang menegaskan bahwa pelapisan menggunakan lilin lebah (*beeswax*) dan kitosan efektif memperbaiki mutu. Secara konsisten, penelitian oleh Fauzia et al., (2024) dan Zatalini et al., (2023) menunjukkan bahwa penambahan *beeswax* pada pelapis kitosan–PVA mampu meningkatkan sifat hidrofobik secara substansial dan memperbaiki kualitas penghalang terhadap air dan lemak. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi bahan alami seperti kitosan dan *beeswax* mampu membentuk lapisan hidrofobik yang efektif tanpa mengurangi sifat *biodegradable* substrat kertas.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengembangkan pelapis *biodegradable* berbasis kombinasi kitosan–PVA–*beeswax* pada kertas kraft konvensional sebagai alternatif pengganti pelapis plastik pada kertas minyak. Variasi komposisi yang digunakan meliputi Kitosan:PVA:*Beeswax* = 70:30:0, 65:30:5, 60:30:10, 55:30:15, dan 50:30:20 (v/v), sehingga memungkinkan analisis menyeluruh terhadap pengaruh perubahan proporsi kitosan, PVA, dan *beeswax* terhadap sifat fisik, mekanik, *barrier*, serta biodegradabilitas kertas terlapis. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan material pelapis yang ramah lingkungan dengan ketahanan air dan minyak yang baik, serta tetap mudah terurai secara alami.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* terhadap sifat fisik kertas kraft terlapis yang meliputi ketahanan air (Cobb₆₀) dan ketahanan minyak (*Kit Rating*)?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* terhadap sifat mekanik kertas kraft terlapis berdasarkan nilai kekuatan tarik?
3. Bagaimana pengaruh variasi komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* terhadap tingkat biodegradabilitas kertas kraft terlapis berdasarkan perubahan massa selama pengujian?
4. Bagaimana karakteristik morfologi permukaan kertas kraft terlapis pada setiap variasi komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* berdasarkan pengamatan citra SEM?
5. Komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* manakah yang menghasilkan kinerja paling optimal sebagai alternatif pelapis plastik pada kertas minyak berdasarkan keseimbangan sifat *barrier*, mekanik, dan biodegradabilitas?

1.3 Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan dan manfaat dari penelitian ini adalah:

1.3.1 Tujuan

- a. Menganalisis pengaruh variasi komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* terhadap sifat fisik kertas kraft terlapis, meliputi ketahanan air dan minyak.
- b. Menganalisis pengaruh variasi komposisi pelapis terhadap sifat mekanik kertas kraft terlapis berdasarkan kekuatan tarik.
- c. Menganalisis pengaruh variasi komposisi pelapis terhadap biodegradabilitas kertas kraft terlapis.
- d. Menganalisis morfologi permukaan kertas kraft terlapis pada setiap variasi komposisi pelapis menggunakan SEM.

- e. Menentukan komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* paling optimal sebagai alternatif pelapis plastik berdasarkan kinerja sifat fisik, mekanik, dan biodegradabilitas.

1.3.2 Manfaat

- a. Bagi perkembangan ilmu pengetahuan: Memberikan kontribusi empiris mengenai pengaruh variasi komposisi kitosan–PVA–*beeswax* terhadap sifat fisik, mekanik, morfologi, dan biodegradabilitas pelapis *biodegradable* pada kertas kraft.
- b. Bagi industri material ramah lingkungan: Menyediakan dasar ilmiah serta formulasi pelapis *biodegradable* yang aplikatif sebagai alternatif pengganti lapisan plastik konvensional (PE/PP) pada kertas minyak.
- c. Bagi penelitian lanjutan: Menjadi rujukan untuk pengembangan material komposit biopolimer–lipid lain, termasuk variasi perlakuan proses dan jenis substrat, guna meningkatkan performa *barrier* dan keberlanjutan kemasan berbasis kertas.

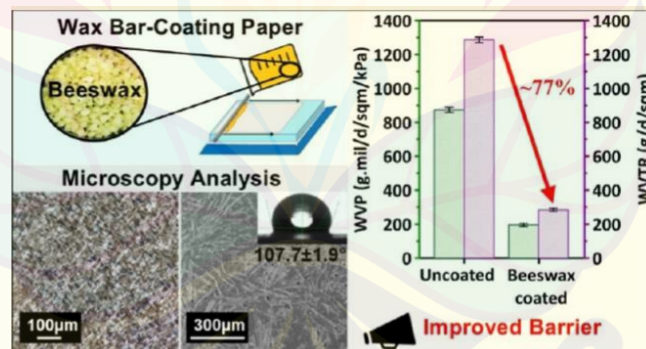
1.4 Batasan Masalah

1. Substrat yang digunakan adalah kertas kraft konvensional, dengan kertas kraft tanpa pelapis digunakan sebagai kontrol pembandingan.
2. Bahan pelapis dibatasi pada komposit berbasis kitosan, polivinil alkohol (PVA), dan *beeswax*.
3. Variasi komposisi pelapis dibatasi pada lima formula, yaitu 70:30:0, 65:30:5, 60:30:10, 55:30:15, dan 50:30:20 (v/v).
4. Ruang lingkup penelitian hanya mencakup proses pelapisan kertas kraft menggunakan komposit kitosan–PVA–*beeswax* tanpa membahas modifikasi kimia lanjutan pada polimer.
5. Karakterisasi difokuskan pada sifat fisik (ketahanan minyak, penyerapan air), sifat mekanik (kekuatan tarik), morfologi permukaan (SEM), dan biodegradabilitas (*soil burial test*).

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu Terkait Pelapis *Biodegradable* Berbasis Kitosan–PVA–*Beeswax*

Pelapis *biodegradable* berbasis kitosan, PVA, dan *beeswax* banyak dikembangkan sebagai alternatif pengganti polietilena (PE) pada kertas. Kitosan memiliki kemampuan *film-forming* dan sifat antimikroba, tetapi sifat hidrofilik serta kerapuhan film membatasi performa *barrier*-nya (dos Santos et al., 2022; Suyambulingam et al., 2023). Penambahan PVA dengan rasio umum 70:30 atau 60:40 meningkatkan fleksibilitas dan *tensile strength* melalui pembentukan ikatan hidrogen (Kanimozhi et al., 2016). Untuk meningkatkan sifat *barrier*, *beeswax* ditambahkan sebagai fase hidrofobik; kandungan 5–25% dilaporkan mampu meningkatkan ketahanan air dan minyak, meskipun pada kadar tinggi film menjadi lebih kaku (Sultan et al., 2021). Selain itu, Jahangiri et al. (2024b) menunjukkan bahwa *beeswax* menurunkan permeabilitas uap air melalui pembentukan jalur difusi berkelok (*tortuous path*). Perubahan permukaan setelah pelapisan ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Efektivitas pelapisan *beeswax* pada kertas yang meningkatkan hidrofobisitas dan menurunkan WVP/WVTR (Jahangiri et al., 2025).

Penelitian mengenai kombinasi kitosan, PVA, dan *beeswax* masih terbatas. Namun, studi kitosan–PVA dan kitosan–*beeswax* telah menunjukkan pengaruh terhadap sifat mekanik dan *barrier*. Ringkasannya disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tinjauan Penelitian Terdahulu Terkait Material Kitosan–PVA–*Beeswax* dan Aplikasi Pelapisan Kertas

Peneliti (Tahun)	Variabel / Material	Metode Uji	Hasil Pengujian
dos Santos et al., (2022)	Kertas berlapis <i>beeswax</i> (5–20%)	<i>Cobb Test</i> (60s)	Nilai Cobb menurun dari 120–150 g/m ² (tanpa lapis) menjadi 18–35 g/m ² setelah aplikasi <i>beeswax</i> , peningkatan ketahanan air yang sangat signifikan.
Chaireh et al., (2020)	Pelapisan biopolimer-lipid pada kertas kraft; variasi lipid 5–25%	<i>Grease Resistance / Oil Penetration</i>	Waktu penetrasi minyak meningkat dari <10 detik (<i>uncoated</i>) menjadi >120 detik. Peningkatan mencapai 10–15 kali lipat, menunjukkan efektivitas lipid sebagai lapisan hidrofobik.
Jahangiri et al., (2024)	Film kitosan–lipid– <i>beeswax</i> ; <i>beeswax</i> 5–20%	ISO 16532-2 (<i>Kit Rating</i>)	<i>Kit Rating</i> meningkat dari 3–4 (tanpa <i>beeswax</i>) menjadi 7–10 setelah penambahan <i>beeswax</i> 10–15%. Permukaan menjadi lebih non-polar dan tidak mudah basah oleh minyak.
Zatalini et al., (2023)	Film komposit kitosan–PVA; rasio umum 70:30 dan 60:40	<i>Tensile Strength & Elongation</i>	<i>Tensile Strength</i> meningkat dari 18–25 MPa (kitosan murni) menjadi 28–40 MPa dengan PVA. <i>Elongation</i> meningkat dari 5–10% menjadi 20–35%, menunjukkan peningkatan fleksibilitas film.
Tanpichai et al., (2020)	Kitosan sebagai pelapis biopolimer; tanpa lipid	<i>Water Barrier & Mechanical Test</i>	Kitosan memiliki <i>Tensile Strength</i> tinggi, tetapi WVP tetap tinggi karena sifat hidrofilik → dasar perlunya lipid seperti <i>beeswax</i> untuk meningkatkan water resistance.
Sultan et al., (2021)	Kitosan– <i>beeswax</i> dengan variasi 5–25%	<i>Solvent Casting; Water/Oil Resistance</i>	Peningkatan <i>beeswax</i> menurunkan penyerapan air hingga 40–60%; ketahanan minyak meningkat signifikan. <i>Beeswax</i> berlebih meningkatkan kekakuan film.
dos Santos et al., (2022)	Biopolimer kitosan (tanpa lipid)	<i>Soil burial test</i>	Penurunan massa mencapai 40–60% dalam 14–21 hari. Kelembaban tanah mempercepat degradasi melalui aktivitas enzim mikroba.

2.2 Kertas Laminasi: Karakteristik dan Kriteria Mutu SNI

2.2.1 Kertas Dasar (*Base Paper*) dan Spesifikasi Mutu SNI

Base paper berbahan *kraft pulp* memiliki kekuatan struktural yang baik dan mutunya diatur dalam SNI 6519.2016 (Istikowati et al., 2020). Namun, sifatnya yang hidrofilik menyebabkan *barrier* terhadap air dan lemak rendah sehingga memerlukan pelapis seperti *beeswax* (dos Santos et al., 2022; Jahangiri et al., 2024b). Persyaratan mutu *base paper* menurut SNI 6519:2016 disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Persyaratan Mutu Kertas Dasar untuk Kertas Bungkus Berlaminasi Plastik (SNI 6519.2016, 2016)

No.	Parameter	Satuan	Persyaratan
1	Gramatur	g/m ²	70
2	Ketahanan Tarik, AM (Arah Mesin)	kN/m	min.1,65
3	Kekasaran (Bendish)	mL/menit	maks.1.700
4	Daya Serap Air (Cobb ₆₀)	g/m ²	maks.120
5	Kadar Air	%	maks.8

2.2.2 Kriteria Kinerja *Barrier* Tahan Minyak dan Keseimbangan Mutu

Penelitian ini bertujuan mengembangkan pelapis sebagai alternatif pengganti laminasi plastik pada kemasan makanan berminyak, sehingga ketahanan minyak menjadi parameter utama dalam evaluasi sifat *barrier* (dos Santos et al., 2022). Pengujian mengacu pada SNI 8688:2019, sedangkan persyaratan mutu kertas tahan minyak disajikan pada Tabel 2.3 (BSN, 2019).

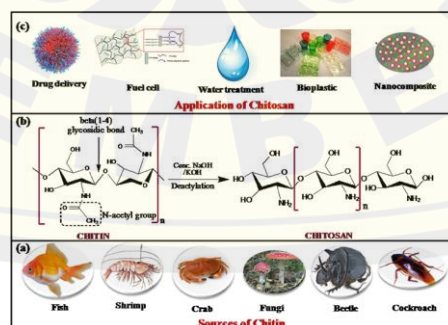
Tabel 2. 3 Persyaratan mutu kertas tahan minyak (SNI 8688.2019, 2019)

No.	Parameter	Satuan	Persyaratan
1	Gramatur	g/m ²	maks. 50
2	Ketahanan minyak (<i>rating kit</i>), sisi yang didariri	-	min. 6
3	Kadar air	%	maks. 7
4	Daya serap air (Cobb ₆₀), sisi yang tidak didariri	g/m ²	maks. 30
5	Indeks tarik, AM	N·m/g	min. 52
6	Fluoresensi	brightness unit	maks. 0,2
7	pH permukaan	-	6 – 8

2.3 Komponen Pelapis: Kitosan, PVA, dan *Beeswax* (Lilin Lebah)

2.3.1 Kitosan

Kitosan merupakan biopolimer kationik turunan kitin yang melimpah, memiliki kemampuan membentuk film (*film-forming*) dan aktivitas antimikroba sehingga berpotensi sebagai material kemasan pangan aktif (Suyambulingam et al., 2023; Tanpichai et al., 2020). Selain memiliki karakter biologis yang baik untuk berbagai aplikasi fungsional (Escárcega-Galaz et al., 2018), kitosan bersifat hidrofilik sehingga memiliki *barrier* uap air yang rendah dan film yang cenderung rapuh, sehingga memerlukan modifikasi komposit untuk meningkatkan kinerjanya (dos Santos et al., 2022; Zatalini et al., 2023). Struktur dasar kitosan, sumber kitin, dan berbagai aplikasinya ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 2 a). Sumber kitin; b). Proses deasetilasi kitin menjadi kitosan; c). Aplikasi kitosan pada berbagai bidang (Gopi et al., 2020)

Karakteristik kitosan yang dikutip dari *Handbook of Chitin and Chitosan* (2020) disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Karakteristik kitosan (Gopi et al., 2020)

No.	Parameter / Sifat	Nilai / Rentang	Implikasi
1	Derajat deasetilasi (DD)	55–95%	Mempengaruhi kekuatan film & kelarutan
2	Berat molekul (Mw)	190–310 kDa	Mempengaruhi kekuatan & fleksibilitas material
3	Tensile strength	30–60 MPa	Film kuat namun rapuh
4	Elongation at break	<5–15%	Membutuhkan <i>plasticizer</i> atau komposit
5	Water vapor permeability	Tinggi	<i>Barrier</i> air rendah; butuh modifikasi
6	Water contact angle (WCA)	60°–80°	Sangat hidrofilik

2.3.2 Polivinil Alkohol (*Polyvinyl Alcohol* / PVA)

Polivinil alkohol (PVA) adalah polimer sintetis larut air yang memiliki biokompatibilitas dan kekuatan tarik tinggi (Alhulaybi & Dubdub, 2024). Dalam komposit, PVA berperan sebagai compatibilizer yang meningkatkan kekuatan dan elastisitas film melalui pembentukan ikatan hidrogen antara gugus –OH PVA dan gugus –NH₂ kitosan sehingga menghasilkan jaringan polimer yang lebih stabil dan homogen (Kanimozhi et al., 2016; Zatalini et al., 2023). Sifat PVA dipengaruhi oleh derajat hidrolisis dan massa molekul yang menentukan kristalinitas, kekuatan mekanik, serta kelarutan dalam air (Filimon et al., 2025). Partikel dan struktur rantai PVA ditunjukkan pada Gambar 2.4. dan karakteristik umum PVA disajikan pada Tabel 2.5.



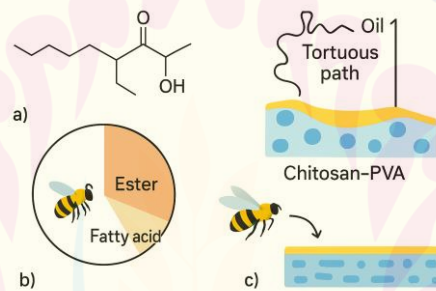
Gambar 2. 3 a) Polivinil alkohol (PVA), b) struktur rantai PVA (Alhulaybi & Dubdub, 2024)

Tabel 2. 5 Karakteristik PVA (Filimon et al., 2025)

No.	Parameter / Sifat	Nilai / Rentang	Implikasi
1	Massa molekul (Mw)	9.000–186.000 g/mol	Mempengaruhi kekuatan & kelarutan
2	Derajat hidrolisis	<i>Partially–fully hydrolyzed</i>	Menentukan kristalinitas & swelling
3	<i>Film-forming</i>	Sangat baik	Membentuk film homogen
4	Kekuatan mekanik	Tinggi & fleksibel	Mengurangi kerapuhan kitosan
5	Hidrofilisitas	Tinggi (gugus –OH)	Mempengaruhi permeabilitas air
6	Stabilitas termal	Baik	Mendukung aplikasi pemanasan
7	Biokompatibilitas	Baik	Cocok untuk kemasan dan biomaterial

2.3.3 Beeswax (Lilin Lebah)

Beeswax merupakan lipid alami yang tersusun atas ester rantai panjang dan asam lemak, serta berfungsi sebagai agen hidrofobik dalam formulasi film dan *coating* biopolimer (Sultan et al., 2021). Polaritasnya yang rendah membentuk lapisan penghalang terhadap air dan minyak pada substrat berbasis selulosa (Chaireh et al., 2020). Dalam matriks kitosan–PVA, *beeswax* mengisi pori-pori dan membentuk jalur difusi berkelok (*tortuous path*) yang menghambat penetrasi cairan (Jahangiri et al., 2024b), sedangkan struktur kristalin yang tersusun atas ester, asam lemak, dan alkohol rantai panjang memberikan permeabilitas yang rendah (Nur Hanani et al., 2014). Komponen dan mekanisme *beeswax* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 4 a) struktur kimia; b) komposisi *beeswax* ; c) mekanisme hidrofobik *beeswax* (Chaireh et al., 2020; Jahangiri et al., 2025)

Selain meningkatkan sifat *barrier*, *beeswax* bersifat *biodegradable* dan aman untuk aplikasi pangan sehingga berpotensi sebagai pelapis kemasan ramah lingkungan (Tyuftin et al., 2020). Namun, penambahan *beeswax* yang berlebihan dapat meningkatkan kekakuan dan menurunkan fleksibilitas film (Afedzi et al., 2022). Oleh karena itu, rasio *beeswax* perlu dioptimalkan untuk memperoleh keseimbangan antara sifat mekanik dan ketahanan minyak. Karakteristik *beeswax* disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Karakteristik *Beeswax* (Foo et al., 2019)

No	Parameter / Sifat	Nilai / Deskripsi
1	Komposisi kimia	Ester & asam lemak merupakan komponen dominan
2	<i>Water contact angle</i>	95–110° (hidrofobik kuat)
3	Permeabilitas air	Rendah karena struktur kristalin lipid
4	Ketahanan minyak	Meningkat drastis dengan <i>beeswax</i> 10–20%
5	Bidang aplikasi	<i>Coating</i> pangan & biopolimer ramah lingkungan
6	Pengaruh mekanik	<i>Beeswax</i> tinggi → film lebih kaku

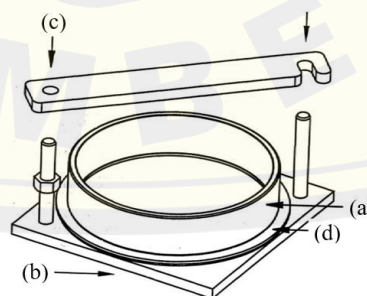
2.4 Formulasi Pelapis dan Metode Aplikasi

Pelapis kitosan–PVA–*beeswax* memerlukan proses emulsifikasi agar *beeswax* dapat terdispersi secara homogen di dalam matriks polimer (dos Santos et al., 2022). *Beeswax* dilelehkan pada suhu 60–70°C, kemudian dicampurkan ke dalam larutan kitosan–PVA melalui proses homogenisasi sehingga terbentuk emulsi yang stabil dan menghasilkan lapisan yang lebih rapat serta mampu meningkatkan ketahanan terhadap transmisi uap air (W. Zhang et al., 2014). Pada aplikasi pelapis kertas, beberapa metode seperti *dip-coating* dan *bar-coating* umum digunakan untuk memperoleh lapisan yang seragam (Istikowati et al., 2020; Jahangiri et al., 2024b; Tanpichai et al., 2020). Namun, pada penelitian ini digunakan *metode casting*, yaitu dengan menuangkan emulsi pelapis ke permukaan kertas kemudian meratakannya menggunakan *glass rod* hingga membentuk lapisan yang homogen. Setelah proses pelapisan, sampel dikeringkan (*curing*) untuk menghilangkan pelarut sekaligus membentuk ikatan fisik antara kitosan dan PVA sehingga diperoleh lapisan yang kohesif dan melekat kuat pada serat selulosa (Tanpichai et al., 2020).

2.5 Landasan Teori Pengujian

2.5.1 Daya Serap Air (*Water Absorption*)

Cobb Test digunakan untuk menentukan jumlah air yang diserap oleh kertas dalam periode waktu tertentu. Pengujian dilakukan dengan memberikan air pada permukaan sampel seluas 100 cm² selama beberapa waktu. Setelah air dibuang dan permukaan dikeringkan, sampel ditimbang kembali. Alat *Cobb Test* ditunjukkan dalam gambar 2.8



Gambar 2. 5 *Cobb Test* (a) Gelang logam, (b) Pelat logam, (c) Alat penjepit, (d) Bantalan karet (SNI 0499-2008, n.d.)

Nilai Cobb dihitung berdasarkan perubahan massa material sebelum dan sesudah kontak air. Rumus dasar *Cobb Test* sesuai SNI adalah:

$$Cobb_x = \frac{(m_2 - m_1)}{A} \times F \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

$Cobb_x$ = nilai Cobb (g/m²)

m_1 = massa awal sampel (g)

m_2 = massa setelah kontak air (g)

A = luas sampel (cm²)

F = factor konversi satuan luas

2.5.2 Ketahanan Minyak (*Oil/Grease Resistance*)

Ketahanan minyak diuji menggunakan metode ISO 16532-2:2007 (*Surface Repellency Test/Kit Rating*). Uji ini meneteskan larutan dengan tingkat agresivitas tertentu ke permukaan sampel selama 15 detik. *Kit Rating* ditentukan dari nomor larutan tertinggi yang tidak menimbulkan pendarkaan atau noda minyak. Lapisan *Beeswax* meningkatkan resistensi minyak karena bersifat non-polar dan mampu menutup pori-pori, sehingga penetrasi minyak terhambat (Jahangiri et al., 2025). Formulasi Larutan Kit (*Kit Solutions*) pada Uji *Surface Repellency* berdasarkan ISO 16532-2:2007

2.5.3 Kekuatan Tarik dan Elongasi Putus

Kekuatan tarik menunjukkan kemampuan material menahan beban sebelum putus (Bi et al., 2020). Pada komposit kitosan–PVA, interaksi ikatan hidrogen antara gugus –OH PVA dan gugus amina atau hidroksil kitosan memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kekuatan tarik sekaligus menjaga fleksibilitas film (Olarte-Paredes et al., 2021). Penambahan *beeswax* cenderung menurunkan kekuatan tarik biopolimer karena sifat mekaniknya yang lemah, meskipun meningkatkan sifat *barrier* (Betancur-D'Ambrosio et al., 2024).

Perhitungan kekuatan tarik (*Tensile Strength*) dilakukan dengan rumus:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan:

σ = kekuatan tarik (MPa)

F_{max} = gaya maksimum sebelum putus (N)

A = luas penampang awal sampel (mm²)

Sementara itu, elongasi putus menunjukkan persentase perubahan panjang material pada saat putus. Nilai ini memberikan gambaran tentang kelenturan dan keuletan komposit. Perhitungannya adalah:

$$\text{Elongation at Break} = \frac{L_{\text{putus}} - L_0}{L_0} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan:

L_0 = panjang awal sampel (mm)

L_{putus} = panjang saat putus (mm)

2.5.4 Uji Biodegradabilitas

Uji biodegradabilitas menilai kemampuan material terurai oleh aktivitas mikroorganisme di tanah. Bakteri dan jamur menghasilkan enzim yang memecah polimer seperti kitosan menjadi molekul sederhana. Kelembaban tanah mempercepat proses ini melalui peningkatan aktivitas mikroba serta swelling pada material yang memperbesar area kontak enzim (dos Santos et al., 2022). Rumus menghitung laju degradasi material menurut SNI 7188.7:2016 di tampilkan pada rumus di bawah ini.

$$\% \text{Degradasi} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\% \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan :

W_0 = massa awal (kering)

W_t = massa pada waktu ke-t (kering)

2.6 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini terdiri dari hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1). Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa variasi komposisi kitosan–PVA–*beeswax* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat *barrier*, sifat mekanik, maupun biodegradabilitas kertas kraft terlapis. Sementara itu, hipotesis alternatif (H_1) menyatakan bahwa variasi komposisi kitosan–PVA–*beeswax* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ketiga sifat tersebut, serta terdapat komposisi tertentu yang mampu menghasilkan keseimbangan terbaik antara ketahanan terhadap air dan minyak, kekuatan dan fleksibilitas, serta kemampuan biodegradasi.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis pengaruh perubahan komposisi pelapis kitosan–PVA–*beeswax* terhadap sifat *barrier*, sifat mekanik, dan biodegradabilitas kertas kraft. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, persiapan bahan, pembuatan larutan pelapis, proses pelapisan, pengeringan, pengujian sampel, serta analisis data.

3.2 Waktu dan Tempat

Penelitian berjudul “*Pengaruh Variasi Komposisi Pelapis Kitosan–PVA–Beeswax terhadap Barrier dan Biodegradabilitas Kertas Kraft untuk Aplikasi Kemasan Tahan Air Minyak*” dilaksanakan pada Desember 2025–April 2026 di Laboratorium Material Maju, CDAST Universitas Jember serta laboratorium pendukung untuk pembuatan sampel dan pengujian sifat fisik, mekanik, dan biodegradabilitas.

3.3 Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas:

Variasi komposisi pelapis: (Kitosan:PVA:*Beeswax* = 70:30:0; 65:30:5; 60:30:10; 55:30:15; 50:30:20 v/v)

2. Variabel Terikat:

- a). Nilai Cobb₆₀ (daya serap air)
- b). Ketahanan minyak (*Kit Rating*)
- c). Kekuatan Tarik, Elongasi dan Modulus Elastisitas
- d). Biodegradabilitas (persentase kehilangan massa)
- e). Uji Morfologi (SEM)

3. Variabel Kontrol:

- a) Konsentrasi PVA tetap 30%
- b) Gramatur dan jenis kertas kraf
- c) Kondisi tanah pada uji biodegradasi dijaga tetap lembab

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1) Timbangan analitik | 7) <i>Glass rod</i> |
| 2) <i>Hot plate magnetic stirrer</i> | 8) <i>Cutter</i> |
| 3) Oven | 9) <i>Alat Cobb Test Custom</i> |
| 4) Gelas laboratorium | 10) <i>Universal Testing Machine (UTM)</i> . |
| 5) <i>High-speed mixer</i> | 11) <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> |
| 6) <i>Termometer</i> | 12) <i>Stopwatch</i> |

3.4.2 Bahan

- 1) Kertas kraft 70gsm sesuai SNI 6519.2016.
- 2) Kitosan *Shrimpshell extract pharma grade(Phy Edumia)*
- 3) Polivinil Alkohol (PVA) *medium viscosity (Asana Chemical)*
- 4) *Beeswax refined/Cera Alba* (By Kimia Herbal)
- 5) Asam asetat glassial 99% *food grade (Supelco)*
- 6) Akuades.
- 7) Tween 80 (*Chemiku store*)
- 8) Larutan uji Kit (ISO 16532-2).
- 9) Tanah humus

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Pembuatan Larutan Pelapis

- a. Menyiapkan larutan kitosan dalam asam asetat 1% dan larutan PVA dalam akuades sesuai kondisi penelitian.
- b. Mencampurkan larutan kitosan dan PVA sesuai variasi komposisi.
- c. Melelehkan *beeswax*, kemudian menambahkan Tween 80 sebagai emulsifier.
- d. Menambahkan *beeswax* cair ke dalam campuran kitosan–PVA sambil dihomogenisasi hingga terbentuk emulsi stabil.
- e. Larutan pelapis digunakan untuk proses pelapisan.

3.5.2 Proses Pelapisan pada Kertas Kraft

- a. Kertas kraft ditempatkan pada media datar.

- b. Larutan pelapis diaplikasikan menggunakan metode casting hingga merata.
- c. Sampel didiamkan beberapa menit untuk mengurangi gelembung udara.
- d. Sampel dikeringkan dalam oven hingga lapisan mengering sempurna.
- e. Sampel didinginkan pada suhu ruang sebelum pengujian.

3.5.3 Pengujian Sampel

a. Uji Daya Serap Air (Cobb₆₀)

Sampel dipotong sesuai SNI 0499:2008 kemudian diuji menggunakan metode Cobb₆₀. Air didiamkan selama 60 detik sebelum permukaan dikeringkan dan sampel ditimbang kembali untuk menghitung nilai Cobb berdasarkan Persamaan (2.1). Setiap variasi diuji sebanyak tiga kali.

b. Uji Ketahanan Minyak (*Kit Rating*)

Pengujian ketahanan minyak dilakukan mengacu ISO 16532-2 menggunakan larutan *Kit*. Nilai *Kit Rating* ditentukan berdasarkan larutan dengan nomor tertinggi yang tidak menimbulkan *darkening*. Setiap variasi diuji tiga kali.

c. Uji Kekuatan Tarik

Sampel dipotong sesuai standar SNI ISO 1924-2 dan diuji menggunakan UTM untuk mendapatkan nilai *Tensile Strength* dan *Elongation at break*.

d. Uji Biodegradabilitas (*Soil burial test*)

Sampel dikubur pada tanah lembab sesuai SNI 7188.7:2016 selama 30 hari. Pengamatan dilakukan pada hari ke-0, 5, dan 10 berdasarkan perubahan massa.

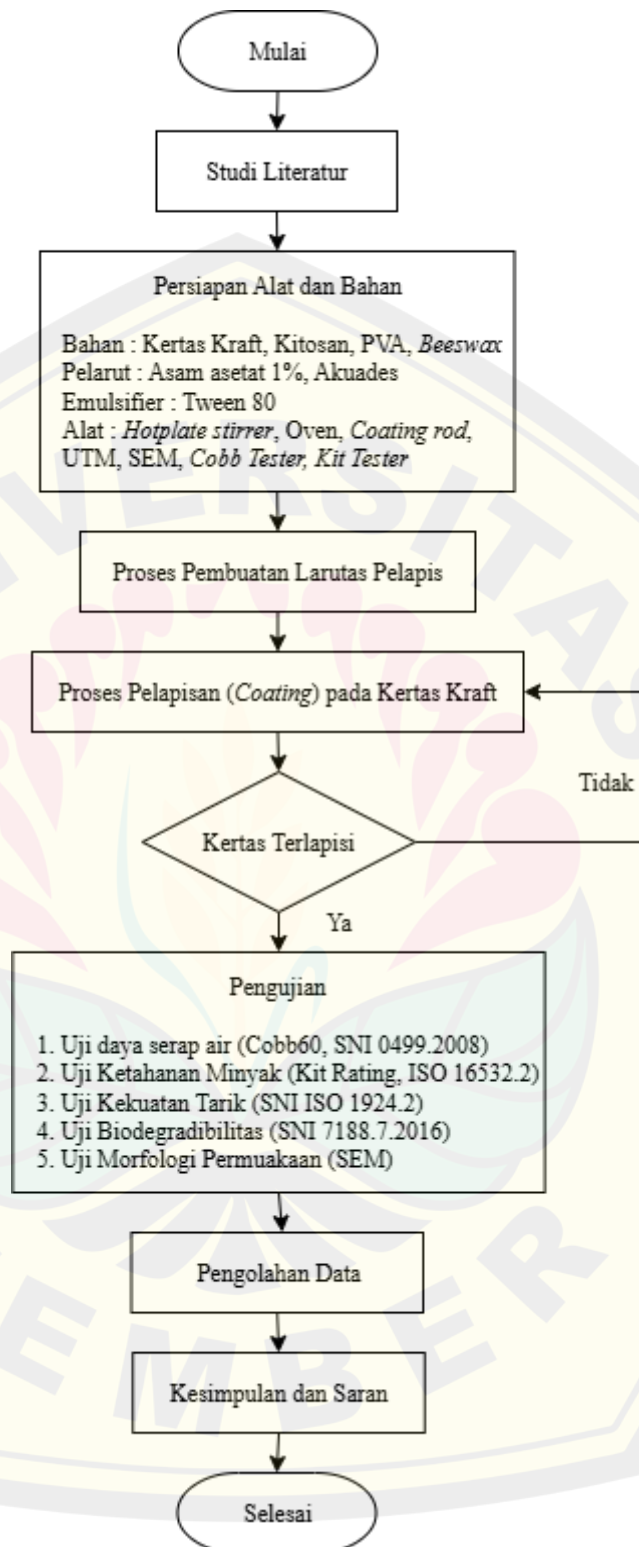
e. Uji Morfologi Permukaan (SEM)

Morfologi permukaan diamati menggunakan SEM untuk mengevaluasi perubahan permukaan akibat variasi komposisi pelapis.

3.5.4 Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi pengaruh variasi komposisi pelapis kitosan-PVA-*beeswax* serta menentukan komposisi yang paling optimum.

3.6 Diagram Alir



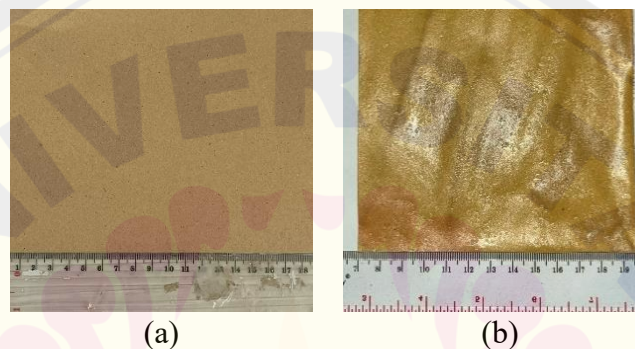
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pelapisan Kertas Kraft

Pada penelitian ini telah dilakukan pelapisan kertas kraft menggunakan komposit kitosan–PVA–*beeswax* dengan beberapa variasi komposisi. Proses pelapisan bertujuan untuk meningkatkan sifat *barrier* terhadap air dan minyak.

Visual permukaan kertas kraft setelah pelapisan ditampilkan pada Gambar 4.1.

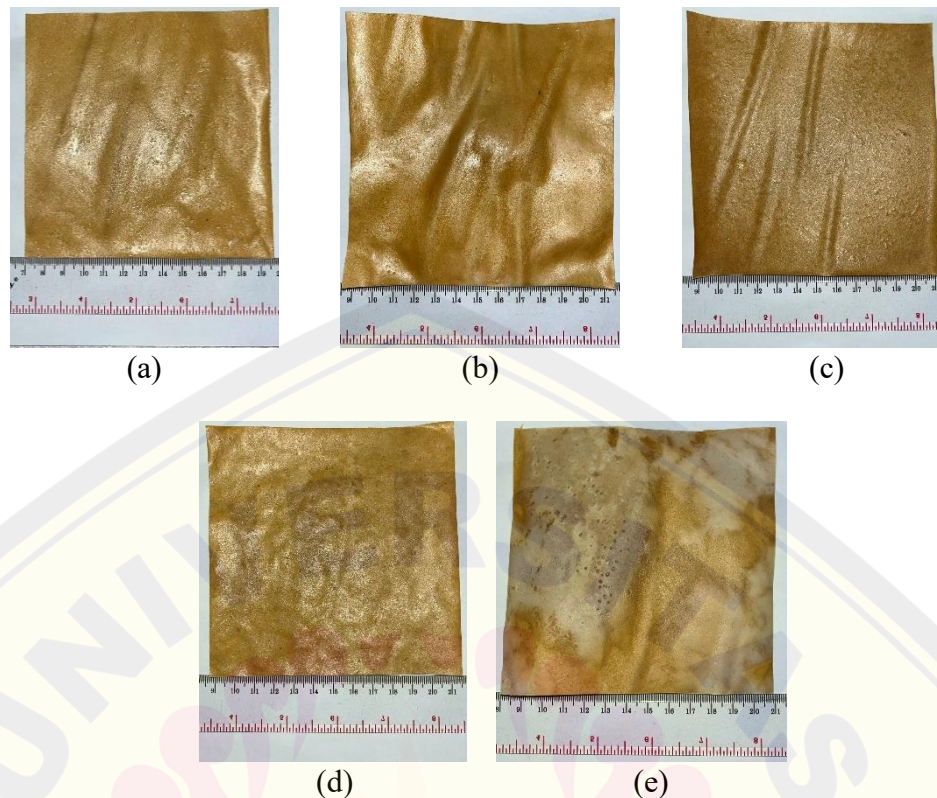


Gambar 4. 1 Visual permukaan kertas kraft (a) sebelum pelapisan, (b) setelah pelapisan

Berdasarkan pengamatan, permukaan kertas yang telah dilapisi menjadi lebih halus dan pori-pori terlihat tertutup. Seiring peningkatan kadar *beeswax*, permukaan tampak lebih homogen dan mengkilap. Namun, pada komposisi tinggi, lapisan cenderung lebih tebal dan kaku.

4.1.1 Spesimen Uji Daya Serap Air (Cobb₆₀)

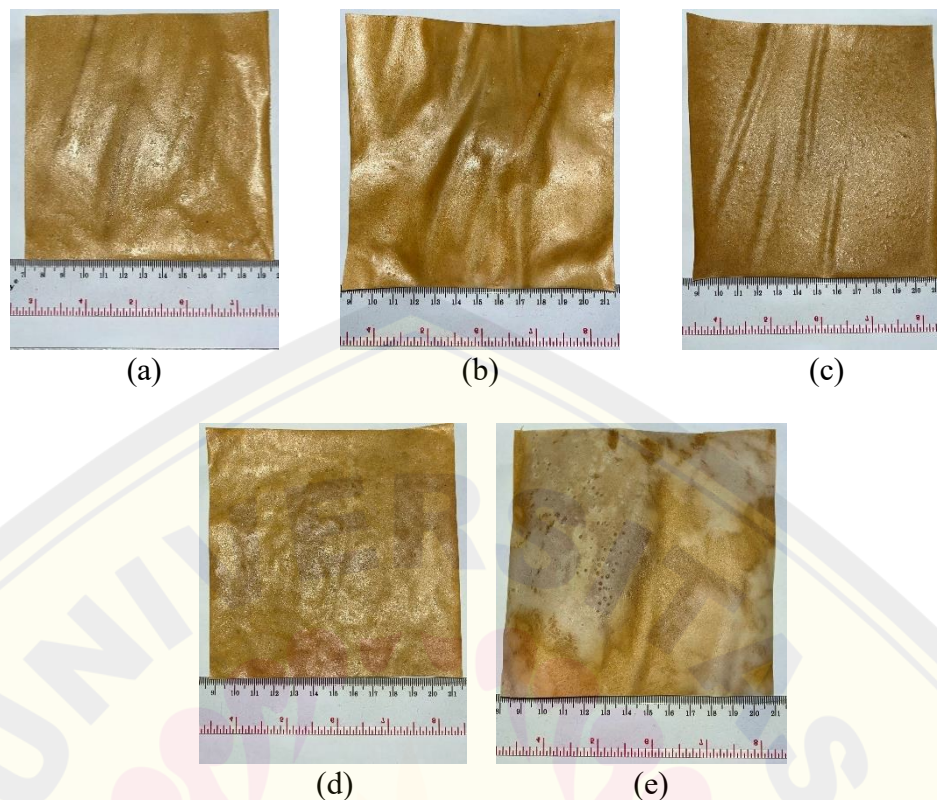
Spesimen uji daya serap air (Cobb₆₀) berupa kertas kraft yang telah dilapisi komposit kitosan–PVA–*beeswax* dengan variasi komposisi 70:30:0, 65:30:5, 60:30:10, 55:30:15, dan 50:30:20 (v/v). Sampel dipotong sesuai standar (SNI 0499-2008, 2008) dan digunakan untuk mengevaluasi pengaruh pelapis terhadap kemampuan kertas dalam menyerap air. Dokumentasi spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Spesimen Uji *Cobb Test* ; (a)KIT1/PVA, (b)KIT2/PVA/BW1, (c)KIT3/PVA/BW2, (d)KIT4/PVA/BW3, (e)KIT5/PVA/BW4

4.1.2 Spesimen Uji Ketahanan Minyak (*Kit Rating*)

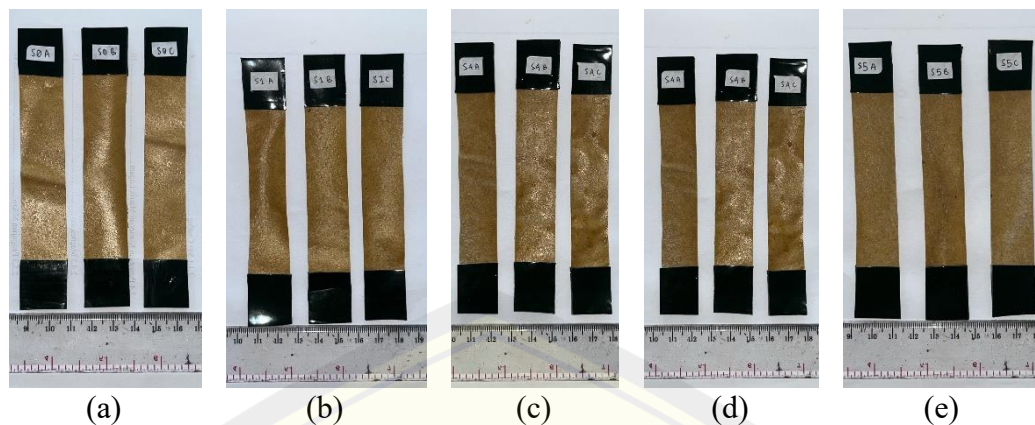
Spesimen uji ketahanan minyak (*Kit Rating*) berupa kertas kraft yang telah dilapisi komposit kitosan–PVA–*beeswax* dengan variasi komposisi 70:30:0, 65:30:5, 60:30:10, 55:30:15, dan 50:30:20 (v/v). Sampel dipotong sesuai ukuran pengujian berdasarkan metode ISO 16532-2:2007(ISO 16532-2, 2007) dan digunakan untuk mengevaluasi kemampuan lapisan dalam menghambat penetrasi minyak. Dokumentasi spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 spesimen *Kit Test*; (a)KIT1/PVA, (b)KIT2/PVA/BW1, (c)KIT3/PVA/BW2, (d)KIT4/PVA/BW3, (e)KIT5/PVA/BW4

4.1.3 Spesimen Uji Kekuatan Tarik dan Elongasi

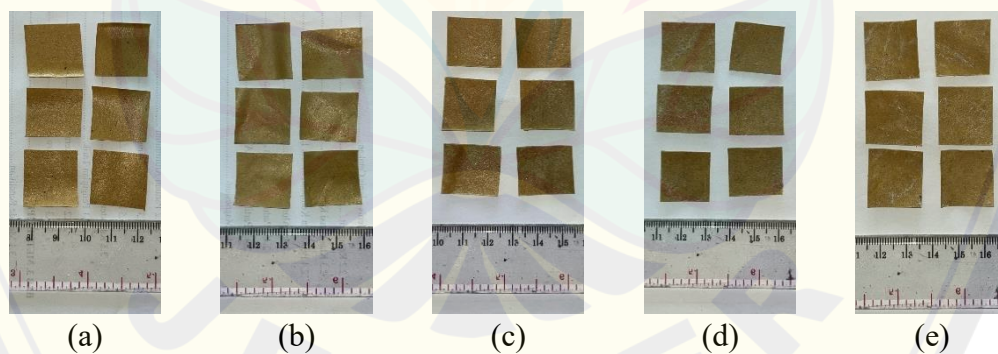
Spesimen uji kekuatan tarik dan elongasi berupa kertas kraft terlapis komposit kitosan–PVA–*beeswax* dengan variasi komposisi 70:30:0, 65:30:5, 60:30:10, 55:30:15, dan 50:30:20 (v/v). Sampel dipotong sesuai standar (ISO 1924-2, 2008) dan digunakan untuk mengevaluasi pengaruh pelapis terhadap kekuatan tarik serta kemampuan regangan kertas sebelum putus. Dokumentasi spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Spesimen Uji Kekuatan Tarik dan Elongasi; (a)KIT1/PVA, (b)KIT2/PVA/BW1, (c)KIT3/PVA/BW2, (d)KIT4/PVA/BW3, (e)KIT5/PVA/BW4

4.1.4 Spesimen Uji Biodegradabilitas

Spesimen uji biodegradabilitas berupa kertas kraft terlapis komposit kitosan–PVA–*beeswax* dengan variasi komposisi 70:30:0, 65:30:5, 60:30:10, 55:30:15, dan 50:30:20 (v/v). Sampel dipersiapkan untuk pengujian *soil burial test* guna mengevaluasi kemampuan material terdegradasi secara alami di dalam tanah melalui pengamatan perubahan massa selama periode pengujian. Dokumentasi spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.5.

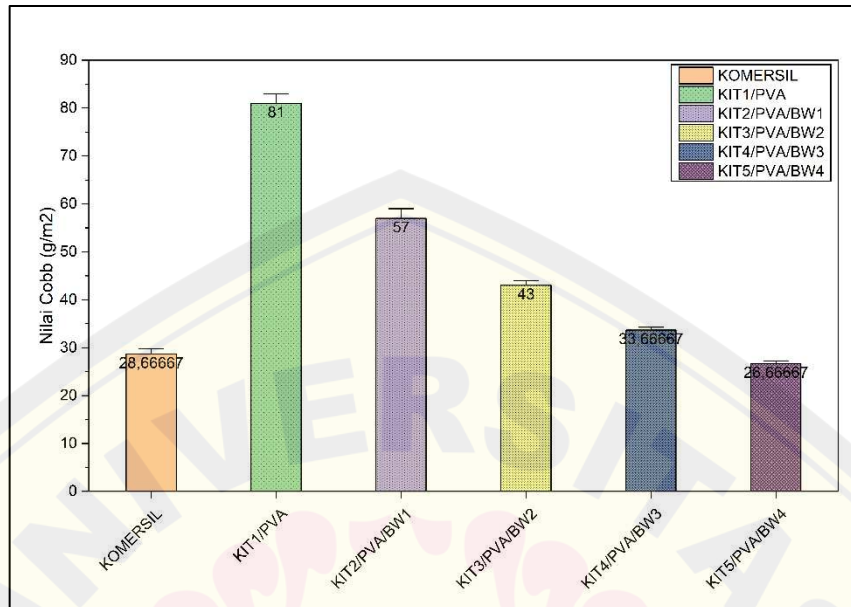


Gambar 4. 5 Spesimen Uji Biodegradabilitas pada variasi: (a) KIT1/PVA, (b) KIT2/PVA, (c) KIT3/PVA, (d) KIT4/PVA/BW2, dan (e) KIT5/PVA/BW4.

4.2 Hasil Uji Daya Serap Air (Cobb₆₀)

Pengujian daya serap air dilakukan untuk mengetahui kemampuan kertas dalam menyerap air setelah proses pelapisan. Nilai Cobb₆₀ digunakan sebagai

indikator utama dalam menentukan ketahanan terhadap air. Hasil uji daya serap air Cobb₆₀ ditampilkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 hubungan variasi komposisi terhadap nilai Cobb₆₀

Berdasarkan Gambar 4.6, nilai Cobb₆₀ mengalami penurunan seiring dengan perubahan komposisi pelapis, yaitu meningkatnya kadar *beeswax* yang diikuti penurunan kadar kitosan. Nilai Cobb₆₀ tertinggi diperoleh pada variasi KIT1/PVA (70:30:0) sebesar 81 g/m², kemudian menurun pada KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), dan KIT4/PVA/BW3 (55:30:15) masing-masing menjadi 57 g/m², 43 g/m², dan 33,67 g/m². Nilai Cobb₆₀ terendah diperoleh pada variasi KIT5/PVA/BW4 (50:30:20), yaitu sebesar 26,67 g/m². Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi pelapis secara efektif meningkatkan ketahanan air kertas kraft. Semakin rendah nilai Cobb₆₀, semakin baik kemampuan lapisan dalam menghambat penetrasi air ke dalam struktur kertas.

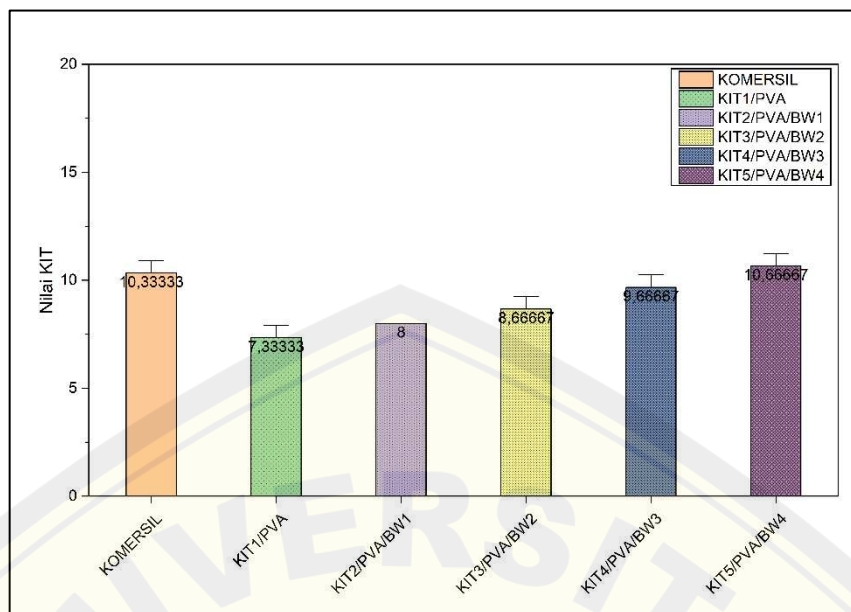
Penurunan nilai Cobb₆₀ dipengaruhi oleh meningkatnya kandungan *beeswax* yang bersifat hidrofobik sekaligus berkurangnya proporsi kitosan yang bersifat hidrofilik. *Beeswax* membentuk lapisan penghalang pada permukaan kertas serta menutup sebagian pori dan celah antarserat, sehingga mengurangi jalur difusi air menuju struktur kertas. Di sisi lain, penurunan kadar kitosan mengurangi jumlah gugus hidroksil (-OH) dan amina (-NH₂) yang mudah berinteraksi dengan molekul

air, sehingga kecenderungan lapisan menyerap air juga berkurang. Dengan demikian, peningkatan ketahanan air pada penelitian ini merupakan hasil sinergi antara bertambahnya fase hidrofobik akibat penambahan *beeswax* dan berkurangnya fraksi hidrofilik akibat penurunan kadar kitosan. Menurut Jahangiri et al. (2024b), penambahan material berbasis *wax* pada pelapis kertas meningkatkan sifat *barrier* terhadap air melalui pembentukan lapisan dengan energi permukaan rendah yang menghambat penetrasi cairan. Selain itu, Zhang et al. (2021) melaporkan bahwa emulsi kitosan-*beeswax* yang diaplikasikan pada kertas mampu meningkatkan ketahanan terhadap uap air dan menurunkan permeabilitas air secara signifikan dibandingkan pelapis kitosan tanpa *beeswax*.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Chaireh et al. (2020) yang menunjukkan bahwa pelapisan *beeswax* pada material berbasis pati meningkatkan sifat hidrofobik dan menurunkan penyerapan air akibat terbentuknya lapisan lipid yang lebih rapat. Penelitian dos Santos et al. (2022) juga melaporkan bahwa penambahan komponen hidrofobik pada pelapis berbasis kitosan efektif meningkatkan performa *barrier* terhadap air dan lemak melalui penutupan pori-pori permukaan material. Temuan serupa dikemukakan oleh Jahangiri et al. (2025), yang menunjukkan bahwa peningkatan kandungan *wax* pada pelapis kertas menghasilkan penurunan nilai penyerapan air secara signifikan. Pada penelitian ini, variasi KIT5/PVA/BW4 menghasilkan nilai $Cobb_{60}$ sebesar 26,67 g/m², merupakan nilai terendah dari seluruh variasi dan telah memenuhi persyaratan SNI 8688:2019 dengan batas maksimum $Cobb_{60}$ sebesar 30 g/m². Hasil tersebut menunjukkan bahwa formulasi dengan kandungan *beeswax* tertinggi dan kandungan kitosan terendah memberikan ketahanan air terbaik pada kertas kraft.

4.3 Uji Ketahanan Minyak (*Kit Rating*)

Pengujian ketahanan minyak dilakukan untuk mengetahui kemampuan kertas dalam menahan penetrasi minyak. Parameter yang digunakan adalah nilai *Kit Rating*. Hasil uji ketahanan minyak ditampilkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Grafik hubungan variasi komposisi terhadap nilai *Kit Rating*

Berdasarkan Gambar 4.7, nilai *Kit Rating* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan perubahan komposisi pelapis, yaitu meningkatnya kadar *beeswax* yang diikuti penurunan kadar kitosan. Nilai *Kit Rating* terendah diperoleh pada variasi KIT1/PVA (70:30:0) sebesar 7,34, kemudian meningkat pada variasi KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), dan KIT4/PVA/BW3 (55:30:15) masing-masing menjadi 8,00, 8,67, dan 9,67. Nilai tertinggi diperoleh pada variasi KIT5/PVA/BW4 (50:30:20), yaitu sebesar 10,67. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi pelapis memberikan pengaruh positif terhadap ketahanan minyak kertas kraft. Semakin tinggi kandungan *beeswax* dan semakin rendah proporsi kitosan dalam formulasi, semakin tinggi nilai *Kit Rating* yang dihasilkan.

Peningkatan nilai *Kit Rating* dipengaruhi oleh bertambahnya kandungan *beeswax* yang merupakan material berbasis lipid dengan sifat non-polar dan hidrofobik, serta berkurangnya kandungan kitosan yang relatif lebih hidrofilik. *Beeswax* membentuk lapisan penghalang yang mampu menutup pori-pori permukaan kertas dan memperpanjang jalur difusi minyak sehingga penetrasi minyak ke dalam struktur serat menjadi lebih sulit. Di sisi lain, penurunan kadar kitosan mengurangi fraksi komponen hidrofilik pada lapisan sehingga afinitas

permukaan terhadap cairan berminyak juga menurun. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menghasilkan peningkatan ketahanan minyak pada seluruh variasi pelapis. Menurut dos Santos et al. (2022), penambahan komponen hidrofobik pada pelapis berbasis kitosan mampu meningkatkan sifat *barrier* terhadap lemak dan minyak melalui pembentukan lapisan yang lebih rapat dan memiliki energi permukaan yang rendah. Selain itu, Jahangiri et al. (2025) menyatakan bahwa penggunaan *wax* pada pelapis kertas efektif meningkatkan ketahanan terhadap minyak karena membentuk lapisan kontinu yang menghambat penetrasi zat berminyak ke dalam substrat kertas.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian W. Zhang et al. (2014) yang melaporkan bahwa penambahan *beeswax* pada pelapis berbasis kitosan meningkatkan sifat *barrier* terhadap minyak melalui kombinasi kemampuan pembentukan film dari kitosan dan sifat hidrofobik *beeswax*. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Chaireh et al. (2020), yang menunjukkan bahwa pelapisan *beeswax* menghasilkan lapisan lipid yang lebih efektif dalam menutup pori-pori material sehingga meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi cairan. Berdasarkan SNI 8688:2019, kertas pembungkus tahan minyak disyaratkan memiliki nilai *Kit Rating* minimum 6. Seluruh variasi pada penelitian ini telah memenuhi persyaratan tersebut dengan nilai *Kit Rating* berkisar antara 7,34 hingga 10,67. Variasi KIT5/PVA/BW4 menghasilkan nilai *Kit Rating* tertinggi, yaitu 10,67, bahkan sedikit lebih tinggi dibandingkan sampel komersial yang memiliki nilai 10,34. Hasil tersebut menunjukkan bahwa formulasi dengan kandungan *beeswax* tertinggi dan kandungan kitosan terendah memberikan ketahanan minyak terbaik sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai pelapis ramah lingkungan pada kemasan berbasis kertas.

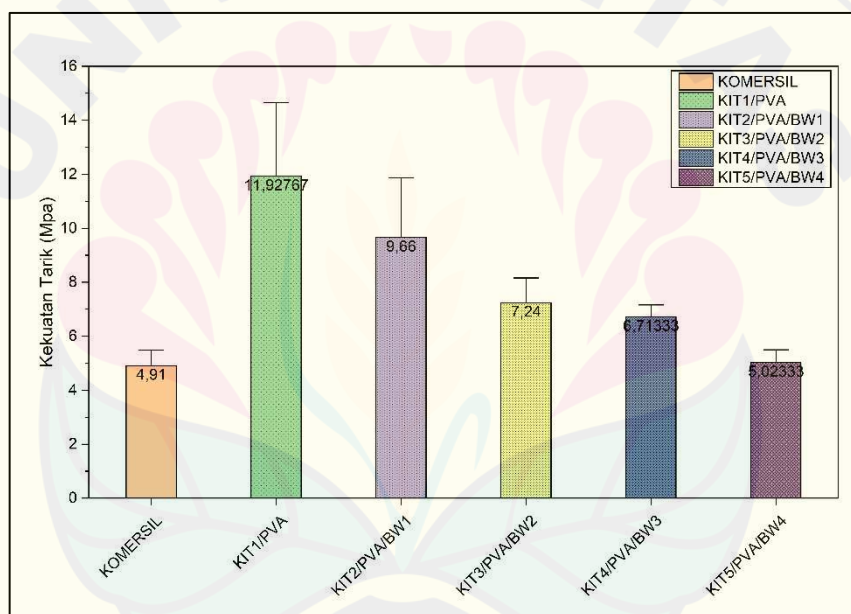
4.4 Hasil Uji Tarik (*Tensile Strength*)

Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik kertas kraft yang telah dilapisi dengan formulasi kitosan, PVA, dan *beeswax* pada berbagai variasi komposisi. Parameter yang diamati meliputi kekuatan tarik (*tensile strength*), elongasi saat putus (*elongation at break*), dan modulus elastisitas (*Young's modulus*). Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine*

(UTM) dengan tiga kali pengulangan pada setiap variasi sampel. Data yang diperoleh digunakan untuk menganalisis pengaruh perubahan komposisi berupa meningkatnya *beeswax* dan menurunnya kitosan terhadap kemampuan material dalam menahan beban tarik, deformasi sebelum putus, dan kekakuan material.

4.4.1 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan material dalam menahan beban tarik maksimum sebelum mengalami kerusakan atau putus. Nilai kekuatan tarik digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi komposisi kitosan, PVA, dan *beeswax* terhadap ketahanan mekanik kertas kraft terlapis. Hasil pengujian kekuatan tarik untuk setiap variasi komposisi ditampilkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Grafik Hubungan Variasi Komposisi dengan Kekuatan Tarik

Berdasarkan Gambar 4.8, nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada variasi KIT1/PVA (70:30:0) sebesar 11,93 MPa, kemudian menurun pada variasi KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), dan KIT4/PVA/BW3 (55:30:15) masing-masing sebesar 9,66 MPa, 7,24 MPa, dan 6,71 MPa. Nilai terendah diperoleh pada variasi KIT5/PVA/BW4 (50:30:20) yaitu sebesar 5,02 MPa. Sementara itu, sampel komersial memiliki kekuatan tarik sebesar 4,91 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi berupa meningkatnya

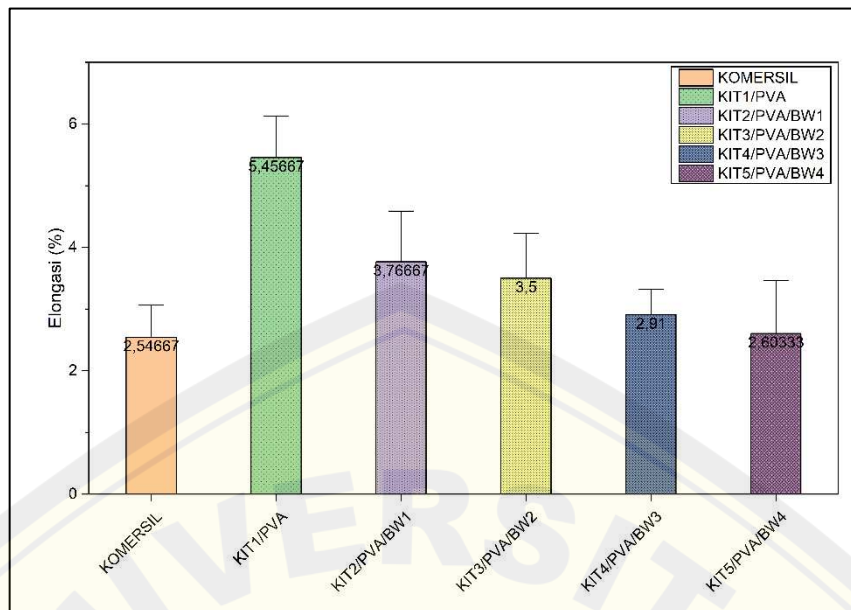
beeswax dan menurunnya kitosan menyebabkan penurunan kekuatan tarik pada lapisan kitosan–PVA–*beeswax*.

Penurunan kekuatan tarik terjadi karena *beeswax* bersifat hidrofobik dan tidak dapat berinteraksi secara optimal dengan matriks kitosan dan PVA yang bersifat hidrofilik. Semakin tinggi kandungan *beeswax*, semakin besar kemungkinan terbentuknya fase yang tidak homogen pada struktur lapisan sehingga ikatan antarmolekul menjadi berkurang. Kondisi tersebut menyebabkan kemampuan material dalam mentransfer dan menahan beban tarik menurun. Menurut Zatalini et al., (2023), interaksi hidrogen antara kitosan dan PVA berperan penting dalam meningkatkan kekuatan mekanik film, sehingga pengurangan proporsi kitosan dan penambahan komponen hidrofobik dapat menurunkan kekuatan tarik material.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Sultan et al., (2021) yang melaporkan bahwa peningkatan kandungan *beeswax* pada film berbasis biopolimer menyebabkan penurunan kekuatan tarik akibat berkurangnya homogenitas matriks. Meskipun mengalami penurunan, seluruh variasi pelapis masih menghasilkan nilai kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan sampel komersial. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi kitosan dan PVA masih mampu mempertahankan integritas mekanik lapisan meskipun dilakukan penambahan *beeswax* hingga 20%.

4.4.2 Elongasi

Elongasi menunjukkan kemampuan material untuk mengalami perpanjangan ketika diberikan gaya tarik hingga mencapai titik putus. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan tingkat fleksibilitas atau kelenturan material setelah proses pelapisan. Hasil pengujian elongasi pada berbagai variasi komposisi pelapis ditampilkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Grafik hubungan variasi komposisi terhadap nilai elongasi

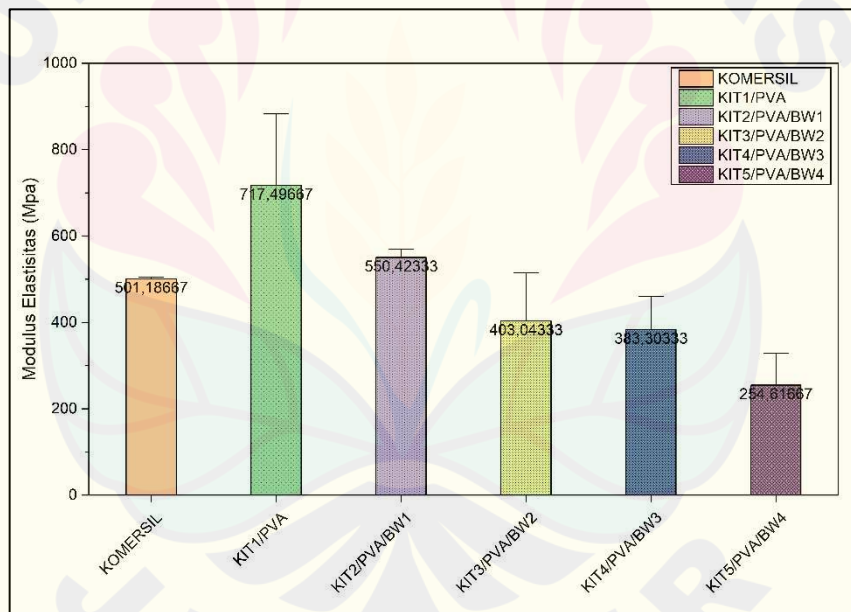
Berdasarkan Gambar 4.9, nilai elongasi tertinggi diperoleh pada variasi KIT1/PVA (70:30:0) sebesar 5,46%, kemudian mengalami penurunan berturut-turut pada KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), dan KIT4/PVA/BW3 (55:30:15) yaitu sebesar 3,77%, 3,50%, dan 2,91%. Nilai elongasi terendah diperoleh pada KIT5/PVA/BW4 (50:30:20) sebesar 2,60%, sedangkan sampel komersial memiliki elongasi sebesar 2,55%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi berupa meningkatnya *beeswax* dan menurunnya kitosan menyebabkan material menjadi semakin kurang elastis.

Penurunan elongasi terjadi karena keberadaan *beeswax* mengurangi mobilitas rantai polimer dalam matriks kitosan–PVA. Pada variasi tanpa *beeswax*, interaksi antara kitosan dan PVA menghasilkan struktur yang lebih fleksibel sehingga material mampu mengalami deformasi yang lebih besar sebelum putus. Sebaliknya, peningkatan kandungan *beeswax* menyebabkan struktur lapisan menjadi lebih rapuh dan kurang mampu mengalami peregangan. Menurut Tanpichai et al., (2020), sifat elongasi dipengaruhi oleh kemampuan rantai polimer untuk bergerak dan berorientasi ketika menerima beban tarik. Adanya fase yang kurang kompatibel dalam matriks dapat membatasi pergerakan rantai polimer sehingga nilai elongasi menurun.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Tyuftin et al., (2020) yang melaporkan bahwa penambahan komponen lipid pada film biopolimer cenderung menurunkan nilai elongasi akibat berkurangnya fleksibilitas struktur film. Meskipun demikian, variasi KIT5/PVA/BW4 masih memiliki nilai elongasi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan sampel komersial, menunjukkan bahwa lapisan yang dihasilkan masih mampu mempertahankan fleksibilitas yang memadai untuk aplikasi kemasan berbasis kertas.

4.4.3 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan parameter yang menggambarkan tingkat kekakuan material terhadap deformasi elastis akibat pembebanan. Nilai modulus elastisitas digunakan untuk mengetahui pengaruh penambahan *beeswax* terhadap kekakuan lapisan kitosan-PVA pada kertas kraft. Hasil pengujian modulus elastisitas untuk setiap variasi komposisi ditampilkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik hubungan variasi komposisi terhadap nilai Modulus Elastisitas

Berdasarkan Gambar 4.10, nilai modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada variasi KIT1/PVA (70:30:0) sebesar 717,50 MPa, kemudian menurun pada KIT2/PVA/BW1 (65:30:5), KIT3/PVA/BW2 (60:30:10), dan KIT4/PVA/BW3 (55:30:15) masing-masing sebesar 550,42 MPa, 403,04 MPa, dan 383,30 MPa. Nilai modulus elastisitas terendah diperoleh pada KIT5/PVA/BW4 (50:30:20)

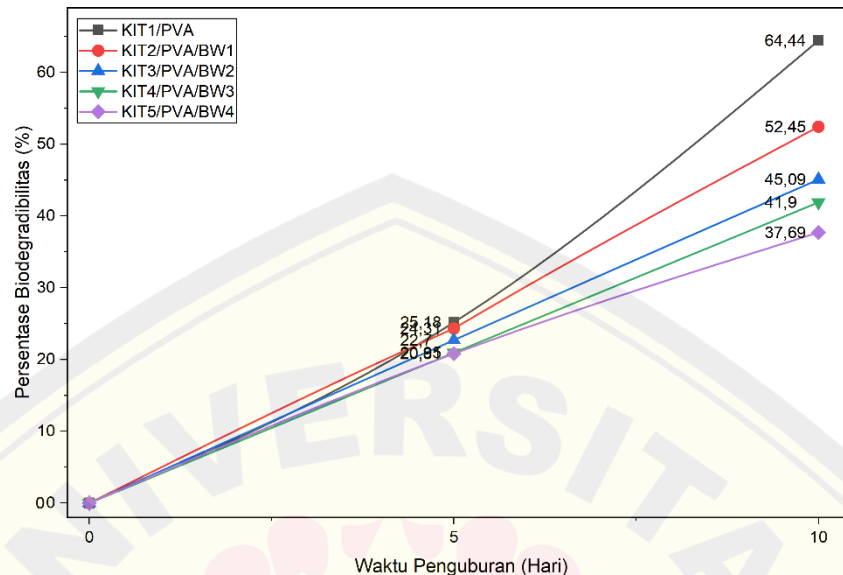
sebesar 254,61 MPa, sedangkan sampel komersial memiliki nilai sebesar 501,19 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi berupa meningkatnya *beeswax* dan menurunnya kitosan menyebabkan penurunan kekakuan material.

Penurunan modulus elastisitas berkaitan dengan berkurangnya interaksi antarmolekul dalam matriks kitosan–PVA akibat meningkatnya fraksi *beeswax*. Pada variasi tanpa *beeswax*, ikatan hidrogen yang terbentuk antara kitosan dan PVA menghasilkan struktur yang lebih kompak dan kaku sehingga modulus elastisitas menjadi lebih tinggi. Ketika kandungan *beeswax* ditingkatkan, fase hidrofobik yang terbentuk dapat mengganggu kontinuitas matriks dan menurunkan kemampuan material dalam menahan deformasi elastis. Menurut Zatalini et al., (2023), peningkatan interaksi antara kitosan dan PVA berkontribusi terhadap peningkatan kekakuan material yang ditunjukkan oleh tingginya nilai modulus elastisitas.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Sultan et al., (2021) yang menyatakan bahwa penambahan *beeswax* pada film berbasis biopolimer dapat menurunkan modulus elastisitas akibat berkurangnya homogenitas struktur matriks. Tren penurunan modulus elastisitas yang diikuti oleh penurunan kekuatan tarik pada penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan *beeswax* memberikan efek positif terhadap sifat *barrier*, namun di sisi lain mengurangi sifat mekanik material. Dengan demikian, diperlukan keseimbangan antara peningkatan ketahanan air dan minyak dengan penurunan sifat mekanik untuk memperoleh formulasi pelapis yang optimal.

4.5 Hasil Uji Biodegradabilitas

Pengujian biodegradasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan kertas kraft terlapis kitosan–PVA–*beeswax* dalam terdegradasi secara alami di lingkungan. Pengujian dilakukan menggunakan metode penguburan dalam tanah (*soil burial test*) selama 10 hari. Tingkat biodegradasi ditentukan berdasarkan persentase kehilangan massa sampel setelah proses penguburan. Pengamatan dilakukan pada hari ke-5 dan hari ke-10 untuk mengetahui laju degradasi material pada setiap variasi komposisi. Hasil pengujian biodegradasi ditampilkan pada Gambar 4.11



Gambar 4. 11 Hasil Uji Biodegradasi Kertas Kraft Terlapis Kitosan–PVA–*Beeswax*

Berdasarkan Gambar 4.11, seluruh variasi sampel mengalami peningkatan persentase biodegradasi dari hari ke-5 hingga hari ke-10. Pada hari ke-5, nilai biodegradasi tertinggi diperoleh pada variasi KIT1/PVA sebesar 25,19%, sedangkan nilai terendah diperoleh pada KIT5/PVA/BW4 sebesar 20,81%. Setelah 10 hari penguburan, persentase biodegradasi meningkat menjadi 64,44% pada KIT1/PVA, 52,45% pada KIT2/PVA/BW1, 45,10% pada KIT3/PVA/BW2, 41,90% pada KIT4/PVA/BW3, dan 37,69% pada KIT5/PVA/BW4. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan *beeswax* membentuk lapisan hidrofobik yang menghambat penetrasi air dan aktivitas mikroba, sedangkan penurunan kadar kitosan mengurangi fraksi biopolimer hidrofilik yang relatif lebih mudah didegradasi..

Penurunan laju biodegradasi pada sampel dengan kandungan *beeswax* yang lebih tinggi berkaitan dengan sifat hidrofobik *beeswax* yang mampu menghambat penetrasi air dan aktivitas mikroorganisme pada permukaan material. Proses biodegradasi umumnya diawali dengan penyerapan air ke dalam struktur material yang kemudian diikuti oleh pemutusan rantai polimer oleh

mikroorganisme dan enzim yang terdapat di dalam tanah. Pada variasi KIT1/PVA yang tidak mengandung *beeswax*, air lebih mudah berdifusi ke dalam lapisan sehingga mempercepat proses degradasi. Sebaliknya, peningkatan kandungan *beeswax* membentuk lapisan yang lebih tahan terhadap air sehingga akses mikroorganisme ke dalam material menjadi lebih terbatas dan laju degradasi menurun (Suyambulingam et al., 2023).

Meskipun demikian, seluruh variasi sampel tetap menunjukkan tingkat biodegradasi yang cukup tinggi setelah 10 hari penguburan, dengan persentase kehilangan massa lebih dari 37%. Hasil ini menunjukkan bahwa kitosan dan PVA sebagai komponen utama pelapis masih mampu mengalami degradasi biologis di lingkungan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Zatalini et al., (2023) yang melaporkan bahwa film berbasis kitosan dan PVA memiliki kemampuan biodegradasi yang baik karena adanya gugus hidroksil dan amina yang mudah diserang oleh mikroorganisme. Dengan demikian, penambahan *beeswax* terbukti meningkatkan sifat *barrier* terhadap air dan minyak, namun pada saat yang sama menurunkan laju biodegradasi material. Variasi KIT5/PVA/BW4 menghasilkan ketahanan *barrier* terbaik berdasarkan hasil Cobb₆₀ dan Kit Test, sedangkan KIT1/PVA menunjukkan biodegradabilitas tertinggi. Hal ini menunjukkan adanya hubungan timbal balik (*trade-off*) antara peningkatan sifat *barrier* dan laju biodegradasi pada kertas kraft terlapis kitosan–PVA–*beeswax*.

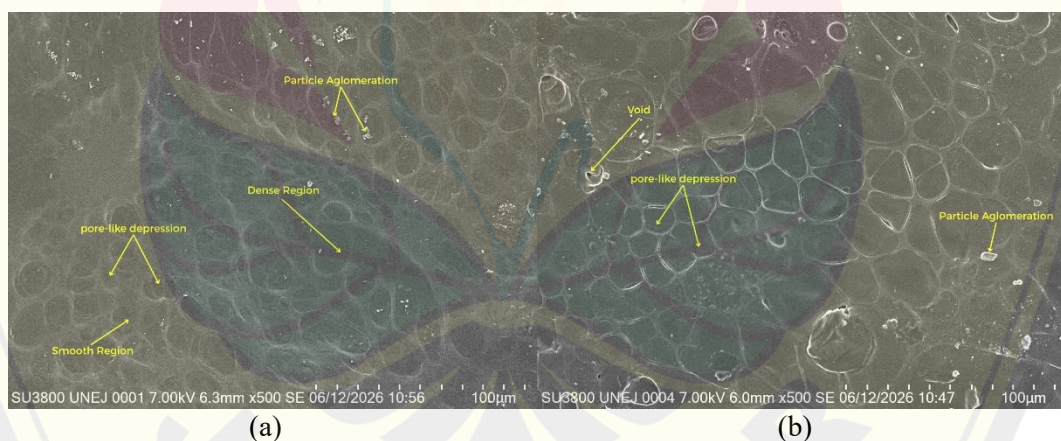
4.6 Hasil Uji Morfologi (SEM)

Berdasarkan hasil pengujian sebelumnya, penambahan *beeswax* ke dalam matriks pelapis kitosan–PVA memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik kertas kraft. Peningkatan kadar *beeswax* dari 0% hingga 20% mampu meningkatkan sifat *barrier* terhadap air dan minyak, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai Cobb₆₀ dari 81 g/m² menjadi 26,67 g/m² serta peningkatan nilai *Kit Rating* dari 7,34 menjadi 10,67. Namun, peningkatan sifat *barrier* tersebut diikuti oleh penurunan sifat mekanik, yaitu kekuatan tarik dari 11,93 MPa menjadi 5,02 MPa, elongasi dari 5,46% menjadi 2,60%, dan modulus elastisitas dari 717,50 MPa menjadi 254,61 MPa. Selain itu, laju biodegradasi juga mengalami penurunan, yang

ditunjukkan oleh berkurangnya kehilangan massa setelah 10 hari penguburan dari 64,44% pada sampel tanpa *beeswax* menjadi 37,69% pada sampel dengan penambahan *beeswax* 20%. Fenomena tersebut menunjukkan adanya hubungan (*trade-off*) antara peningkatan sifat *barrier* dengan penurunan sifat mekanik dan biodegradabilitas akibat meningkatnya sifat hidrofobik lapisan. Oleh karena itu, karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi lapisan pelapis sebagai dasar dalam menjelaskan mekanisme peningkatan sifat *barrier* sekaligus penurunan sifat mekanik dan laju biodegradasi. Pengamatan SEM dilakukan pada variasi KIT1/PVA (BW 0%) sebagai sampel kontrol dan KIT3/PVA/BW2 (BW 10%) sebagai sampel representatif, karena variasi tersebut telah menunjukkan perubahan karakteristik yang nyata dibandingkan kontrol, sekaligus memiliki keseimbangan terbaik antara sifat *barrier*, sifat mekanik, dan biodegradabilitas.

4.6.1 Morfologi Permukaan

Hasil pengamatan morfologi permukaan sampel KIT1/PVA dan KIT3/PVA/BW2 ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Morfologi Permukaan Kertas Kraft Terlapis Kitosan–PVA–*Beeswax* Hasil Pengamatan SEM ; (a) KIT1/PVA, (b)KIT3/PVA/BW2

Hasil pengamatan morfologi permukaan sampel KIT1/PVA dan KIT3/PVA/BW2 menggunakan SEM ditunjukkan pada Gambar 4.12. Berdasarkan citra SEM, sampel KIT1/PVA menunjukkan permukaan yang relatif halus dan tertutup oleh lapisan *coating* yang terbentuk dari campuran kitosan dan PVA. Struktur permukaan tampak cukup seragam dengan keberadaan beberapa cekungan

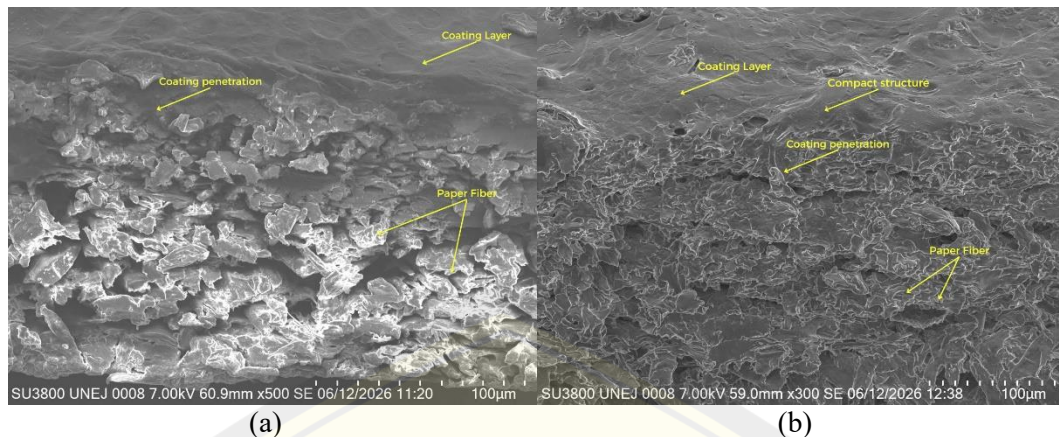
atau depresi berbentuk oval yang masih terlihat pada beberapa area. Cekungan tersebut diduga merupakan pori atau ketidakteraturan permukaan substrat kertas yang belum sepenuhnya tertutupi oleh lapisan *coating*. Meskipun demikian, tidak terlihat adanya retakan (*crack*) maupun diskontinuitas lapisan yang menunjukkan kegagalan pembentukan film. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kombinasi kitosan dan PVA mampu membentuk lapisan yang relatif kontinu pada permukaan kertas kraft.

Berbeda dengan sampel KIT1/PVA, permukaan KIT3/PVA/BW2 menunjukkan morfologi yang lebih padat dengan jumlah cekungan terbuka yang tampak lebih sedikit. Pada beberapa area terlihat adanya domain-domain dengan batas yang lebih jelas serta partikel terang yang terdispersi pada permukaan. Keberadaan fitur tersebut mengindikasikan meningkatnya heterogenitas morfologi setelah penambahan *beeswax*. Namun demikian, lapisan *coating* masih tampak kontinu dan mampu menutupi permukaan substrat secara merata tanpa adanya retakan yang signifikan.

Struktur permukaan yang lebih rapat pada sampel KIT3/PVA/BW2 menunjukkan bahwa penambahan *beeswax* kemungkinan berperan dalam mengurangi jumlah jalur terbuka yang dapat dilalui oleh air dan minyak. Selain itu, sifat hidrofobik *beeswax* diduga menyebabkan terbentuknya daerah-daerah kaya wax yang berkontribusi terhadap peningkatan sifat *barrier*. Hasil pengamatan ini sejalan dengan hasil pengujian Cobb60 dan *Kit Rating* yang menunjukkan bahwa penambahan *beeswax* mampu meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air dan minyak. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Zhang et al., (2014), yang menyatakan bahwa penambahan *beeswax* pada sistem pelapis berbasis biopolimer dapat menghasilkan lapisan yang lebih kompak dan efektif sebagai penghalang terhadap perpindahan cairan.

4.6.2 Morfologi *Cross-Section*

Hasil pengamatan morfologi *cross-section* sampel KIT1/PVA dan KIT3/PVA/BW2 ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Morfologi Penampang Kertas Kraft Terlapis Kitosan–PVA–*Beeswax* Hasil Pengamatan SEM ; (a) KIT1/PVA, (b)KIT3/PVA/BW2

Hasil pengamatan morfologi *cross-section* sampel KIT1/PVA dan KIT3/PVA/BW2 ditunjukkan pada Gambar 4.13. Pada sampel KIT1/PVA terlihat adanya lapisan *coating* yang menutupi bagian permukaan kertas dan berinteraksi dengan jaringan serat substrat. Temuan ini sejalan dengan laporan Reis et al. (2011) yang menunjukkan bahwa pelapis kitosan pada kertas kraft tidak hanya membentuk film kontinu pada permukaan, tetapi juga mengisi ruang pori internal dan mengimpregnasi jaringan serat selulosa sehingga batas lapisan–substrat menjadi kurang tegas pada citra penampang. Batas antara lapisan *coating* dan substrat tidak tampak terpisah secara jelas, yang mengindikasikan adanya kontak yang cukup baik antara *coating* dan permukaan kertas. Selain itu, tidak ditemukan indikasi delaminasi maupun celah antarmuka yang besar pada daerah pengamatan. Struktur internal kertas masih menunjukkan keberadaan rongga antarserat yang merupakan karakteristik alami substrat *kraft paper*.

Pada sampel KIT3/PVA/BW2, lapisan *coating* juga tampak melekat pada permukaan substrat tanpa adanya indikasi delaminasi yang nyata. Dibandingkan dengan KIT1/PVA, bagian lapisan dekat permukaan menunjukkan struktur yang relatif lebih kompak dan rapat. Selain itu, jumlah ruang kosong yang tampak pada area lapisan permukaan cenderung lebih sedikit. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penambahan *beeswax* kemungkinan menghasilkan lapisan yang lebih efektif dalam menutup jalur difusi pada permukaan kertas.

Struktur *cross-section* yang lebih kompak pada sampel KIT3/PVA/BW2 memberikan indikasi bahwa keberadaan *beeswax* tidak hanya memodifikasi morfologi permukaan, tetapi juga memengaruhi densitas lapisan *coating* yang terbentuk. Struktur yang lebih rapat tersebut diduga berkontribusi terhadap peningkatan sifat *barrier* terhadap air dan minyak sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan nilai Cobb60 dan peningkatan *Kit Rating*. Namun demikian, meningkatnya kerapatan dan heterogenitas lapisan akibat keberadaan fase hidrofobik *beeswax* juga kemungkinan menyebabkan penurunan efisiensi transfer tegangan dalam matriks *coating*, sehingga berkorelasi dengan menurunnya tensile strength, elongation, dan modulus elastisitas yang diperoleh pada penelitian ini.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa penambahan 10% *beeswax* menghasilkan lapisan *coating* yang lebih padat dan mampu menutup pori permukaan dengan lebih baik dibandingkan sampel tanpa *beeswax*. Morfologi tersebut mendukung peningkatan sifat *barrier* terhadap air dan minyak, namun pada saat yang sama berpotensi menurunkan sifat mekanik serta memperlambat proses biodegradasi akibat berkurangnya akses air dan mikroorganisme ke dalam struktur material.

4.7 Analisis Keseluruhan Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian Cobb₆₀, *Kit Rating*, sifat mekanik, biodegradabilitas, dan morfologi permukaan, penambahan *beeswax* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik kertas kraft terlapis kitosan-PVA. Peningkatan konsentrasi *beeswax* dari 0% hingga 20% menghasilkan penurunan nilai Cobb₆₀ dari 81 g/m² menjadi 26,67 g/m² serta peningkatan nilai *Kit Rating* dari 7,34 menjadi 10,67. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *beeswax* berperan efektif sebagai komponen hidrofobik yang mampu meningkatkan ketahanan terhadap air dan minyak. Sifat ini berkaitan dengan polaritas *beeswax* yang rendah serta kemampuannya membentuk lapisan penghalang pada permukaan substrat sehingga jalur penetrasi cairan menjadi lebih panjang dan lebih sulit dilalui. Temuan ini sejalan dengan penelitian dos Santos et al., (2022) yang melaporkan bahwa pelapisan *beeswax* mampu menurunkan nilai Cobb secara signifikan, serta

penelitian (Jahangiri et al., 2024a) yang menunjukkan bahwa penambahan *beeswax* meningkatkan nilai *Kit Rating* melalui pembentukan permukaan yang lebih non-polar dan tahan terhadap penetrasi minyak. Selain itu, Chaireh et al., (2020) menyatakan bahwa komponen lipid seperti *beeswax* mampu meningkatkan sifat grease resistance melalui pembentukan lapisan hidrofobik yang efektif dalam menghambat difusi cairan.

Hasil pengamatan morfologi SEM mendukung hasil pengujian *barrier* tersebut. Permukaan sampel yang mengandung *beeswax* menunjukkan struktur lapisan yang lebih rapat dan homogen dibandingkan sampel tanpa *beeswax*. Keberadaan *beeswax* dalam matriks kitosan–PVA diduga mampu mengisi sebagian pori dan celah pada permukaan kertas sehingga membentuk lapisan yang lebih kontinu. Mekanisme ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa *beeswax* dapat membentuk jalur difusi berkelok (*tortuous path*) yang memperlambat penetrasi air dan minyak ke dalam substrat kertas. Dengan demikian, semakin tinggi kandungan *beeswax* maka kemampuan lapisan dalam menghambat perpindahan cairan menjadi semakin baik. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Sultan et al., (2021) dan Jahangiri et al., (2024) yang melaporkan bahwa penambahan *beeswax* pada sistem pelapis berbasis biopolimer mampu meningkatkan sifat *barrier* melalui pembentukan struktur lapisan yang lebih kompak dan hidrofobik.

Di sisi lain, peningkatan kandungan *beeswax* menyebabkan penurunan sifat mekanik material. Nilai kekuatan tarik menurun dari 11,93 MPa pada KIT1/PVA menjadi 5,02 MPa pada KIT5/PVA/BW4, sedangkan elongasi menurun dari 5,46% menjadi 2,60% dan modulus elastisitas menurun dari 717,50 MPa menjadi 254,61 MPa. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun *beeswax* meningkatkan sifat *barrier*, keberadaannya dalam jumlah tinggi dapat mengurangi homogenitas matriks kitosan–PVA. Zatalini et al., (2023) melaporkan bahwa interaksi hidrogen antara kitosan dan PVA berperan penting dalam meningkatkan kekuatan tarik dan fleksibilitas film. Sebaliknya, terbentuknya fase lipid dari *beeswax* dapat mengganggu kontinuitas jaringan polimer sehingga kemampuan material dalam menahan beban tarik menjadi berkurang. Temuan ini juga sesuai dengan penelitian Afedzi et al., (2022) dan Sultan et al., (2021) yang menyatakan

bahwa peningkatan kadar *beeswax* dapat meningkatkan kekakuan lapisan dan menurunkan fleksibilitas material akibat ketidakcocokan fase lipid dengan matriks polimer hidrofilik.

Hasil uji biodegradabilitas menunjukkan kecenderungan yang serupa. Persentase biodegradasi setelah 10 hari penguburan menurun dari 64,44% pada KIT1/PVA menjadi 37,69% pada KIT5/PVA/BW4. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan sifat hidrofobik akibat penambahan *beeswax* tidak hanya menghambat penetrasi air, tetapi juga menghambat aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam proses degradasi material. Meskipun demikian, seluruh variasi sampel masih menunjukkan kemampuan degradasi yang cukup baik karena kitosan dan PVA merupakan material yang bersifat *biodegradable*. Hasil ini sejalan dengan penelitian dos Santos et al., (2022) yang melaporkan bahwa material berbasis kitosan mampu mengalami kehilangan massa sebesar 40–60% selama pengujian biodegradabilitas, serta mendukung konsep kemasan ramah lingkungan yang mudah terurai setelah digunakan.

Secara keseluruhan, variasi KIT5/PVA/BW4 menghasilkan performa *barrier* terbaik yang ditunjukkan oleh nilai Cobb₆₀ terendah dan *Kit Rating* tertinggi. Namun, variasi tersebut juga mengalami penurunan sifat mekanik dan biodegradabilitas yang paling besar. Sementara itu, variasi KIT3/PVA/BW2 menunjukkan keseimbangan karakteristik yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Variasi ini menghasilkan nilai Cobb₆₀ sebesar 43 g/m² dan *Kit Rating* sebesar 8,67 yang telah memenuhi persyaratan SNI 8688:2019 untuk kertas tahan minyak, dengan nilai kekuatan tarik 7,24 MPa, elongasi 3,50%, modulus elastisitas 403,04 MPa, serta biodegradasi sebesar 45,10% setelah 10 hari penguburan. Oleh karena itu, KIT3/PVA/BW2 dapat dianggap sebagai formulasi optimum karena mampu memberikan peningkatan sifat *barrier* yang signifikan tanpa menyebabkan penurunan sifat mekanik dan biodegradabilitas yang terlalu besar. Formulasi ini berpotensi digunakan sebagai pelapis *biodegradable* pada kemasan berbasis kertas yang membutuhkan keseimbangan antara ketahanan terhadap air dan minyak, kekuatan mekanik, serta kemampuan terurai di lingkungan.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh penambahan *beeswax* pada pelapis berbasis kitosan dan PVA terhadap karakteristik kertas kraft, dapat disimpulkan bahwa:

1. Perubahan komposisi pelapis berupa peningkatan kandungan *beeswax* yang diikuti penurunan kadar kitosan meningkatkan sifat barrier kertas terhadap air dan minyak. Nilai $Cobb_{60}$ menurun dari 81 g/m² menjadi 26,67 g/m², sedangkan nilai Kit Rating meningkat dari 7,34 menjadi 10,67 seiring perubahan komposisi pelapis.
2. Perubahan komposisi pelapis berupa peningkatan kandungan *beeswax* dan penurunan kadar kitosan menyebabkan penurunan sifat mekanik kertas terlapis. Nilai kekuatan tarik menurun dari 11,93 MPa menjadi 5,02 MPa, elongasi dari 5,46% menjadi 2,60%, dan Young's modulus dari 717,50 MPa menjadi 254,61 MPa.
3. Seluruh sampel menunjukkan sifat biodegradable. Namun, laju biodegradasi menurun seiring dengan meningkatnya kandungan *beeswax* dan berkurangnya kadar kitosan dalam formulasi pelapis. Persentase biodegradasi setelah 10 hari penguburan menurun dari 64,44% pada KIT1/PVA menjadi 37,69% pada KIT5/PVA/BW4.
4. Hasil SEM menunjukkan bahwa penambahan *beeswax* menghasilkan lapisan yang lebih rapat dan homogen sehingga mendukung peningkatan ketahanan terhadap air dan minyak.
5. Variasi KIT3/PVA/BW2 (60:30:10) merupakan formulasi optimum karena memberikan keseimbangan terbaik antara sifat barrier, sifat mekanik, dan biodegradabilitas, dengan nilai $Cobb_{60}$ sebesar 43 g/m², Kit Rating 8,67, kekuatan tarik 7,24 MPa, elongasi 3,50%, modulus elastisitas 403,04 MPa, dan biodegradasi 45,10%.

5.2 Saran

1. Menggunakan peralatan yang lebih terstandarisasi, seperti Cobb Tester standar, homogenizer, dan bar coater, agar hasil pelapisan dan pengujian lebih konsisten.
2. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan variasi konsentrasi *beeswax* yang lebih beragam untuk memperoleh formulasi optimum yang lebih spesifik
3. Perlu dilakukan penambahan emulsifier atau modifikasi formulasi untuk meningkatkan kompatibilitas antara *beeswax* dan matriks kitosan–PVA.
4. Pengujian tambahan seperti WVTR, FTIR, XRD, atau DSC dapat dilakukan untuk memberikan karakterisasi material yang lebih komprehensif.
5. Pengujian biodegradasi dengan waktu pengamatan yang lebih panjang perlu dilakukan untuk mengevaluasi perilaku degradasi material secara lebih mendalam.
6. Perlu dilakukan pengujian pada aplikasi kemasan pangan nyata untuk menilai potensi penggunaan kertas kraft terlapis sebagai kemasan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afedzi, A. E. K., Ahadjie, V., & Quansah, L. (2022). Gum arabic and beeswax as edible coatings for extending the postharvest shelf life of tomato (*Lycopersicon esculentum*. L) fruit. *Ghana Journal of Science*, 63(2), 31–42. <https://doi.org/10.4314/gjs.v63i2.4>
- Al-Gharrawi, M. Z., Wang, J., & Bousfield, D. W. (2021). *Improving Recycling of Polyethylene-Coated Paperboard with a Nanofibrillated Cellulose Layer*.
- Alhulaybi, Z. A., & Dubdub, I. (2024). Kinetics Study of PVA Polymer by Model-Free and Model-Fitting Methods Using TGA. *Polymers*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/polym16050629>
- Betancur-D'Ambrosio, M. C., Pérez-Cervera, C. E., Barrera-Martinez, C., & Andrade-Pizarro, R. (2024). Antimicrobial activity, mechanical and thermal properties of cassava starch films incorporated with beeswax and propolis. *Journal of Food Science and Technology*, 61(4), 782–789. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05878-x>
- Bi, S., Pang, J., Huang, L., Sun, M., Cheng, X., & Chen, X. (2020). The toughness chitosan-PVA double network hydrogel based on alkali solution system and hydrogen bonding for tissue engineering applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.186>
- BSN. (2019). *PERATURAN KEPALA BADAN STANDARDISASI NASIONAL*.
- Chaireh, S., Ngasatool, P., & Kaewtatip, K. (2020). Novel composite foam made from starch and water hyacinth with beeswax coating for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 1382–1391. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.007>
- dos Santos, J. W. S., Garcia, V. A. dos S., Venturini, A. C., Carvalho, R. A. de, da Silva, C. F., & Yoshida, C. M. P. (2022). Sustainable Coating Paperboard Packaging Material Based on Chitosan, Palmitic Acid, and Activated Carbon: Water Vapor and Fat Barrier Performance. *Foods*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/foods11244037>
- Escárcega-Galaz, A. A., Sánchez-Machado, D. I., López-Cervantes, J., Sanches-Silva, A., Madera-Santana, T. J., & Paseiro-Losada, P. (2018). Mechanical, structural and physical aspects of chitosan-based films as antimicrobial dressings. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.149>
- Fauzia, S. H., Fardiaz, D., Sari, L. R. H., & Masyithoh, D. (2024). Effect of Chitosan-Beeswax Edible Coating on Microbiological Profile of Chicken Thigh Meat at Freezer Storage. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Hasil Ternak*, 19(1), 63–68. <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2024.019.01.7>

- Filimon, A., Dobos, A. M., Onofrei, M. D., & Serbezeanu, D. (2025). Polyvinyl Alcohol-Based Membranes: A Review of Research Progress on Design and Predictive Modeling of Properties for Targeted Application. In *Polymers* (Vol. 17, Number 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym17081016>
- Foo, S. Y., Nur Hanani, Z. A., Rozzamri, A., Ibadullah, W. Z. W., & Ismail-Fitry, M. R. (2019). Effect of Chitosan–Beeswax Edible Coatings on the Shelf-life of Sapodilla (*Achras zapota*) Fruit. *Journal of Packaging Technology and Research*, 3(1), 27–34. <https://doi.org/10.1007/s41783-018-0047-0>
- Gopi, S., Thomas, S., & Pius, A. (2020). *HANDBOOK OF CHITIN AND CHITOSAN. Preparation and Properties Volume 1* (Vol. 1). Elsevier.
- Hong, F., Qiu, P., Wang, Y., Ren, P., Liu, J., Zhao, J., & Gou, D. (2024). Chitosan-based hydrogels: From preparation to applications, a review. In *Food Chemistry: X* (Vol. 21). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101095>
- ISO 1924-2. (2008). *INTERNATIONAL STANDARD Paper and board — Determination of tensile properties*.
- ISO 16532-2. (2007). *Paper and board-Determination of grease resistance-Part 2: Surface repellency test Papier et carton*.
- Istikowati, W. T., Sunardi, & Sutiya, B. (2020). *TEKNOLOGI PULP DAN KERTAS* (Lusyiani, Ed.). Lambung Mangkurat University Press, 2020.
- Jahangiri, F., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2024a). Sustainable biodegradable coatings for food packaging: challenges and opportunities. In *Green Chemistry* (Vol. 26, Number 9, pp. 4934–4974). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3gc02647g>
- Jahangiri, F., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2024b). Sustainable biodegradable coatings for food packaging: challenges and opportunities. In *Green Chemistry* (Vol. 26, Number 9, pp. 4934–4974). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3gc02647g>
- Jahangiri, F., Mohanty, A., Pal, A. K., Clemmer, R., Gregori, S., & Misra, M. (2025). Wax Coatings for Paper Packaging Applications: Study of the Coating Effect on Surface, Mechanical, and Barrier Properties. *ACS Environmental Au*, 5(2), 165–182. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.4c00055>
- Kanimozhi, K., Khaleel Basha, S., & Sugantha Kumari, V. (2016). Processing and characterization of chitosan/PVA and methylcellulose porous scaffolds for tissue engineering. *Materials Science and Engineering C*, 61, 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.084>
- Nur Hanani, Z. A., Roos, Y. H., & Kerry, J. P. (2014). Use and application of gelatin as potential biodegradable packaging materials for food products. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.04.027>

- OECD. (2022). *OECD Economic Outlook, Volume 2022 Issue 2* (OECD Economic Outlook, Vol. 2022). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/f6da2159-en>
- Olarte-Paredes, A., Salgado-Delgado, J. N., Rubio-Rosas, E., Salgado-Delgado, A. M., Hernández-Cocoletzi, H., Salgado-Delgado, R., Moreno-Carpintero, E., & Castaño, V. M. (2021). Physico-chemical properties of a hybrid biomaterial (Pva/chitosan) reinforced with conductive fillers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/app11073040>
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. In *Science of the Total Environment* (Vol. 702). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Reis, A. B., Yoshida, C. M. P., Reis, A. P. C., & Franco, T. T. (2011). Application of chitosan emulsion as a coating on Kraft paper. *Polymer International*, 60(6), 963–969. <https://doi.org/10.1002/pi.3023>
- Sharma, S., & Chatterjee, S. (2017). Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(27), 21530–21547. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9910-8>
- SNI 0499-2008. (2008).
- SNI 6519.2016. (2016).
- SNI 8688.2019. (2019).
- Sultan, M., Hafez, O. M., Saleh, M. A., & Youssef, A. M. (2021). Smart edible coating films based on chitosan and beeswax-pollen grains for the postharvest preservation of Le Conte pear. *RSC Advances*, 11(16), 9572–9585. <https://doi.org/10.1039/d0ra10671b>
- Suyambulingam, I., Gangadhar, L., Sana, S. S., Divakaran, D., Siengchin, S., Kurup, L. A., Iyyadurai, J., & Albert Bernad Noble, K. E. (2023). Chitosan Biopolymer and Its Nanocomposites: Emerging Material as Adsorbent in Wastewater Treatment. In *Advances in Materials Science and Engineering* (Vol. 2023). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2023/9387016>
- Tanpichai, S., Witayakran, S., Wootthikanokkhan, J., Srimarut, Y., Woraprayote, W., & Malila, Y. (2020). Mechanical and antibacterial properties of the chitosan coated cellulose paper for packaging applications: Effects of molecular weight types and concentrations of chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 1510–1519. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.128>
- Tyufin, A. A., Wang, L., Auty, M. A. E., & Kerry, J. P. (2020). Development and assessment of duplex and triplex laminated edible films using whey protein isolate, gelatin and sodium alginate. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(7). <https://doi.org/10.3390/ijms21072486>

- Yolanda, N., Khamidah, N., & Rizali, A. (2021). *Teknologi Edible Coating Menggunakan Lilin Lebah (Beeswax) dan Kitosan Terhadap Mutu Buah Jambu Kristal (Psidium guajava Var.Kristal)*.
- Zatalini, D. fadia, Hendradi, E., Philip Drake, & Sari, R. (2023). The Effect of Chitosan and Polyvinyl Alcohol Combination on Physical Characteristics and Mechanical Properties of Chitosan-PVA-Aloe vera Film. *JURNAL FARMASI DAN ILMU KEFARMASIAN INDONESIA*, 10(2), 151–161. <https://doi.org/10.20473/jfiki.v10i22023.151-161>
- Zhang, Q., Song, M., Xu, Y., Wang, W., Wang, Z., & Zhang, L. (2021). Bio-based polyesters: Recent progress and future prospects. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 120). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101430>
- Zhang, W., Xiao, H., & Qian, L. (2014). Beeswax-chitosan emulsion coated paper with enhanced water vapor barrier efficiency. *Applied Surface Science*, 300, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.005>

LAMPIRAN



<https://drive.google.com/drive/folders/1u0J31SMcno4425Xn29UI346WTMNezQN6?usp=sharing>