

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian Tarik Sampel

Data yang didapatkan dari hasil pengujian tarik sampel berupa nilai kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi pada sampel. Pada **Tabel 4.1** menunjukkan hasil pengujian tarik Sampel PLA dan ekstrak gambir.

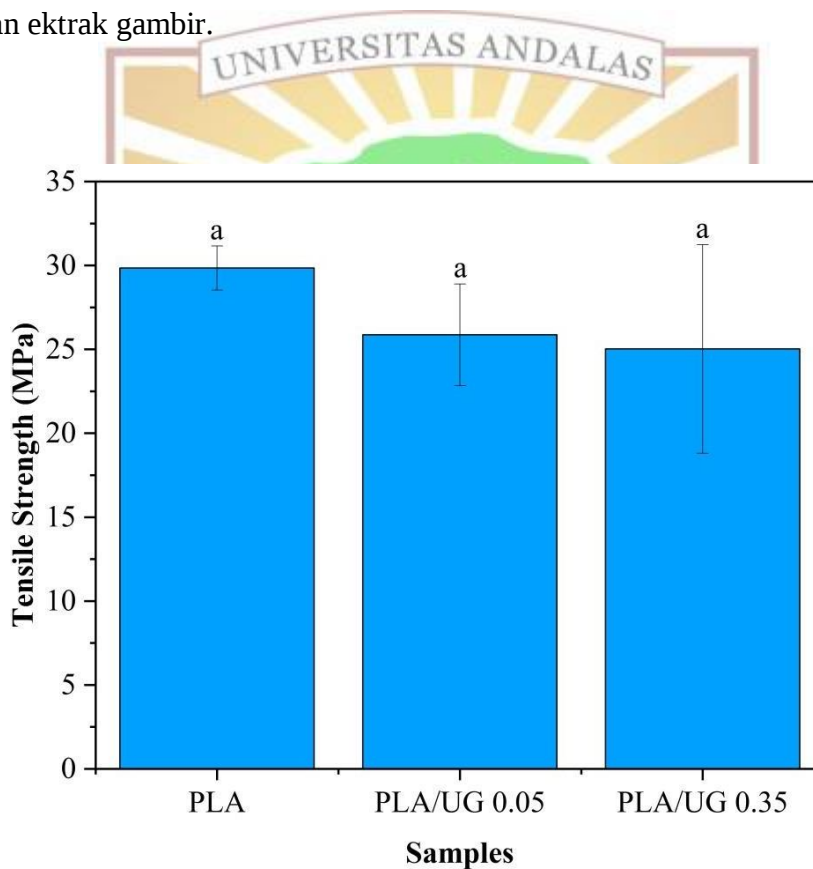
Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Tarik

Sampel	Nomor	Kekuatan Tarik (MPa)		Modulus Elastisitas (MPa)		Elongasi (%)	
PLA	1	30,04	29,84	187,28	236,23	15,80	12,89
	2	31,05		281,21		11,04	
	3	28,44		240,21		11,84	
Standar Deviasi		1,31		47,09		2,55	
PLA/UG 0,05	1	22,63	25,86	1744,68	1436,80	1,64	2,09
	2	28,63		1154,97		2,28	
	3	26,34		1410,76		2,36	
Standar Deviasi		3,02		295,71		0,39	
PLA/UG 0,35	1	27,35	25,02	1768,64	2055,23	1,68	1,69
	2	17,98		2494,21		1,72	
	3	29,74		1902,85		1,68	
Standar Deviasi		6,21		386,04		0,02	

Pada **Tabel 4.1** didapatkan hasil pengujian tarik yang dilakukan tiga kali pada setiap variasi sampel untuk mendapatkan nilai keakuratan yang lebih baik. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat uji tarik yang menghasilkan data mengenai kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi.

4.2 Kekuatan Tarik

Pada **Tabel 4.1** terlihat adanya tren penurunan nilai tensile strength seiring dengan penambahan ekstrak gambir ke dalam matriks PLA. Sampel PLA murni memiliki nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 29,84 MPa. Penambahan ekstrak gambir sebanyak 0,05 g menurunkan kekuatan tarik menjadi 25,86 MPa, dan terus menurun hingga 25,02 MPa pada konsentrasi 0,35 g. Penurunan ini mengindikasikan bahwa keberadaan ekstrak gambir dalam jumlah tertentu dapat mereduksi kemampuan matriks polimer dalam menahan beban tarik maksimal. **Gambar 4.1** menunjukkan grafik hasil dari kekuatan tarik hasil pengujian sampel PLA dan ekstrak gambir.



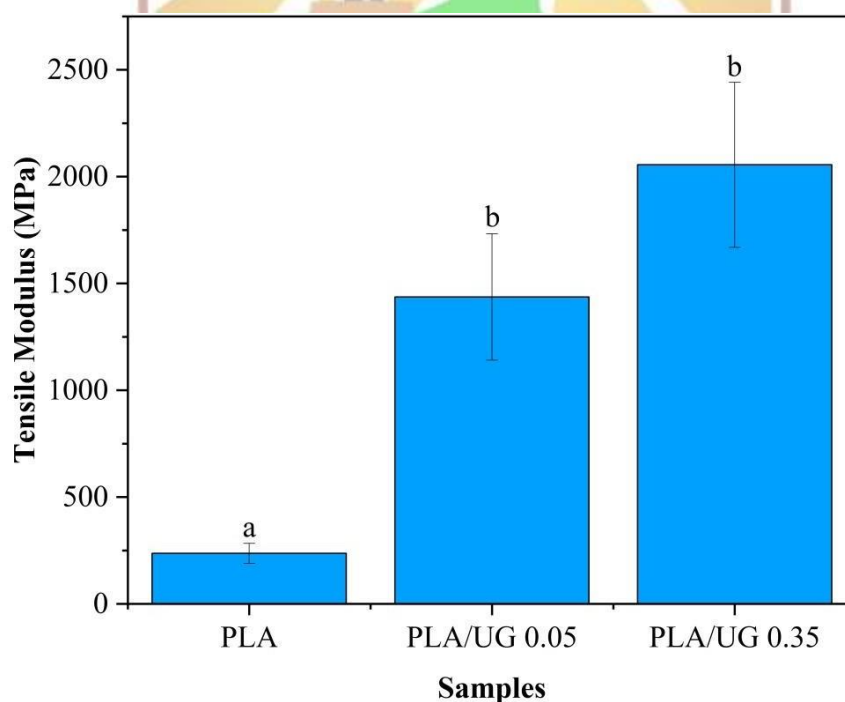
Gambar 4. 1 Grafik Kekuatan Tarik Sampel

Penurunan kekuatan tarik ini diduga disebabkan oleh perbedaan sifat polaritas antara matriks PLA yang bersifat hidrofobik dengan ekstrak gambir yang kaya akan gugus hidroksil (hidrofilik). Perbedaan ini menyebabkan adhesi antarmuka yang kurang optimal, sehingga saat diberi beban tarik, terjadi pemisahan fase (phase separation) yang lebih cepat di area kontak antara filler dan

matriks. Secara mikroskopis, partikel ekstrak gambir yang tidak terdispersi secara sempurna dapat bertindak sebagai stress concentrator. Titik-titik ini menjadi lokasi awal terjadinya perambatan retak (crack propagation), yang menyebabkan material patah pada tingkat tegangan yang lebih rendah dibandingkan dengan polimer murninya.

4.3 Modulus Elastisitas

Pada **Tabel 4.1** terlihat adanya peningkatan Modulus Elastisitas yang signifikan dan bersifat linear seiring dengan bertambahnya konsentrasi ekstrak gambir. Sampel PLA murni memiliki nilai modulus sebesar 236,23 MPa. Nilai ini meningkat drastis menjadi 1436,8 MPa pada penambahan 0,05 g ekstrak gambir, dan mencapai titik tertinggi sebesar 2055,23 MPa pada variasi 0,35 g. Peningkatan total sebesar kurang lebih 770% ini membuktikan bahwa ekstrak gambir memiliki efektivitas yang sangat tinggi dalam mengubah karakteristik mekanik PLA menjadi material yang lebih kaku. **Gambar 4.2** menunjukkan grafik hasil dari modulus elastisitas hasil pengujian sampel PLA dan ekstrak gambir.

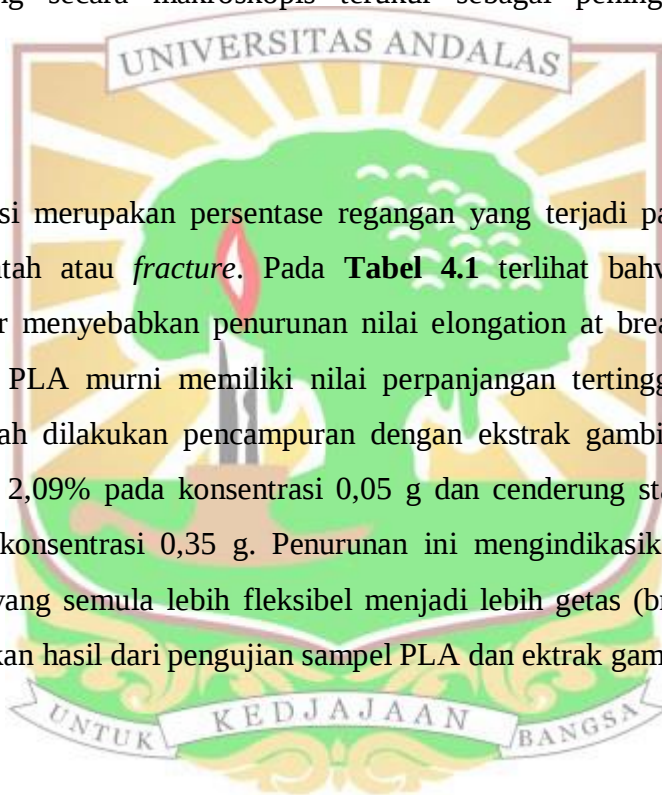


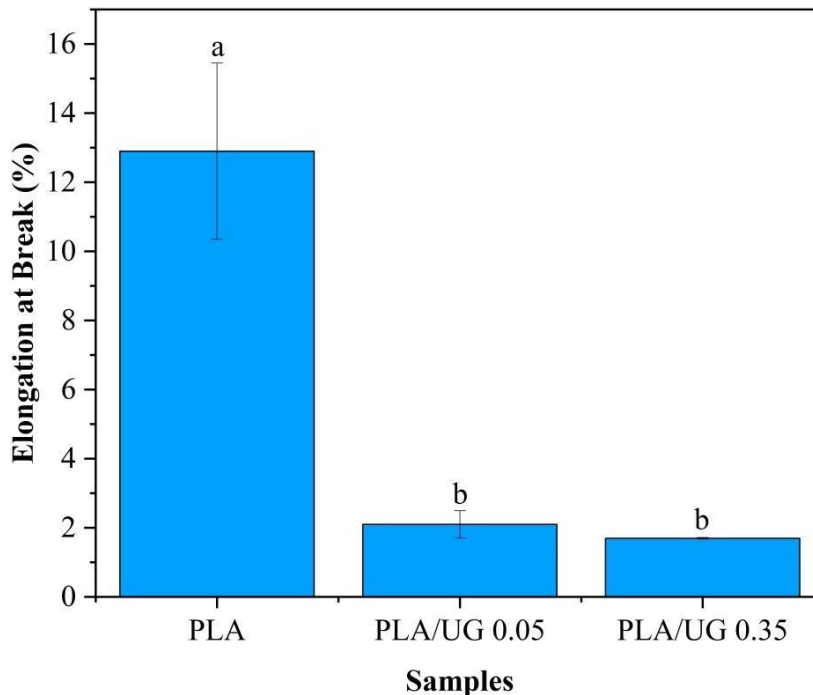
Gambar 4. 2 Grafik Modulus Elastisitas Sampel

Peningkatan nilai modulus yang sangat tajam mengindikasikan bahwa ekstrak gambir sangat berperan efektif dalam meningkatkan kekakuan film PLA. Secara molekuler, kehadiran senyawa polifenol (katekin) dari gambir menciptakan hambatan sterik yang membatasi pergerakan rantai polimer PLA. Hal ini menyebabkan fase elastis material berkurang dan resistensi terhadap deformasi meningkat, sehingga material menjadi lebih kaku (stiff). Kenaikan linear ini juga menunjukkan adanya interaksi antarmuka yang baik melalui pembentukan ikatan hidrogen antara gugus hidroksil (-OH) pada ekstrak gambir dengan gugus karbonil (C=O) pada rantai PLA. Interaksi ini memperkuat struktur internal bioplastik yang secara makroskopis terukur sebagai peningkatan Modulus Elastisitas.

4.4 Elongasi

Elongasi merupakan persentase regangan yang terjadi pada film hingga mengalami patah atau *fracture*. Pada **Tabel 4.1** terlihat bahwa penambahan ekstrak gambir menyebabkan penurunan nilai elongation at break pada matriks PLA. Sampel PLA murni memiliki nilai perpanjangan tertinggi yaitu sebesar 12,89%. Setelah dilakukan pencampuran dengan ekstrak gambir, nilai tersebut turun menjadi 2,09% pada konsentrasi 0,05 g dan cenderung stabil pada angka 1,69% untuk konsentrasi 0,35 g. Penurunan ini mengindikasikan transisi sifat material dari yang semula lebih fleksibel menjadi lebih getas (brittle). **Gambar 4.3** menunjukkan hasil dari pengujian sampel PLA dan ekstrak gambir.





Gambar 4. 3 Grafik Elongasi Sampel

Data Elongation at Break (perpanjangan saat putus) menunjukkan penurunan yang konsisten dibandingkan dengan PLA murni. Data ini sangat sinkron dengan kenaikan Modulus Elastisitas yang kita bahas sebelumnya, ketika material menjadi jauh lebih kaku, maka kemampuan regangnya akan menurun. Penurunan nilai elongasi ini merupakan konsekuensi langsung dari kehadiran partikel ekstrak gambir yang berperan sebagai hambatan fisik (physical hindrance) di dalam matriks polimer. Partikel-partikel ini membatasi kemampuan rantai molekul PLA untuk bergeser atau meregang saat menerima beban tarik. Akibatnya, rantai polimer mencapai titik patah lebih cepat karena ruang gerak konformasi molekul yang terbatas. Kekakuan yang terbentuk akibat ikatan hidrogen antara gugus hidroksil pada ekstrak gambir dan gugus karbonil pada PLA menciptakan struktur yang sangat kokoh namun tidak elastis. Hal ini menyebabkan material kehilangan kemampuan untuk mendisipasikan energi mekanik melalui deformasi plastik, sehingga elongasi material menurun secara signifikan seiring dengan meningkatnya modulus elastisitas.

4.5 Hubungan Kekuatan Tarik dan Modulus Elastisitas

Secara umum, penambahan ekstrak gambir menyebabkan penurunan nilai rata-rata kekuatan tarik (tensile strength) dari 29,84 MPa (PLA) menjadi 25,86 MPa (UG 0,05) dan berturut-turut turun menjadi 25,02 MPa (UG 0,35). Namun, fenomena ini diiringi dengan peningkatan nilai Modulus Elastisitas (Young's Modulus) yang sangat drastis, melonjak dari 236,23 MPa pada PLA murni menjadi 1436,80 MPa (UG 0,05) dan mencapai puncaknya pada 2055,23 MPa (UG 0,35). Tren berlawanan ini mengindikasikan bahwa keberadaan senyawa polifenol utama dalam gambir (seperti katekin) bertindak sebagai agen pengkaku (stiffening agent) yang membatasi pergerakan rantai makromolekul polimer PLA. Kristal atau partikel ekstrak yang terdispersi dalam matriks meningkatkan rigiditas (kekakuan) film secara signifikan, yang tercermin dari lonjakan nilai modulus yang masif.

Penurunan kekuatan tarik yang disertai peningkatan modulus ini sejalan dengan penelitian terdahulu pada sistem komposit polimer serupa. Ketika konsentrasi filler organik meningkat, kecenderungan terjadinya aglomerasi partikel akibat interaksi antar-hidrogen sesama polifenol juga meningkat. Aglomerasi ini menciptakan titik pemusatan tegangan (stress concentration points) di dalam matriks polimer, yang mempercepat kegagalan awal material sebelum mencapai beban maksimum yang dapat ditahan oleh matriks polimer murninya.

4.6 Hubungan Modulus Elastisitas dengan Elongasi (*Elongation at Break*)

Korelasi terbalik yang sangat tegas terlihat antara Modulus Elastisitas dan Elongasi (%). Seiring meningkatnya kekakuan material (modulus naik dari 236,23 MPa ke 2055,23 MPa), kemampuan elongasi atau fleksibilitas film menurun tajam dari 12,89% pada PLA murni menjadi 2,09% pada penambahan gambir 0,05 g, dan semakin getas hingga 1,69% pada konsentrasi 0,35 g.

Hubungan trade-off antara rigiditas dan daktilitas merupakan karakteristik klasik dalam rekayasa material komposit polimer-biomassa. Penurunan elongasi yang signifikan ini membuktikan bahwa penggabungan ekstrak gambir

mengganggu kontinuitas matriks PLA dan membatasi mobilitas rantai polimer saat menerima gaya tarik eksternal. Struktur material bertransformasi dari karakteristik polimer yang semi-fleksibel menjadi material yang sangat getas (brittle).

