

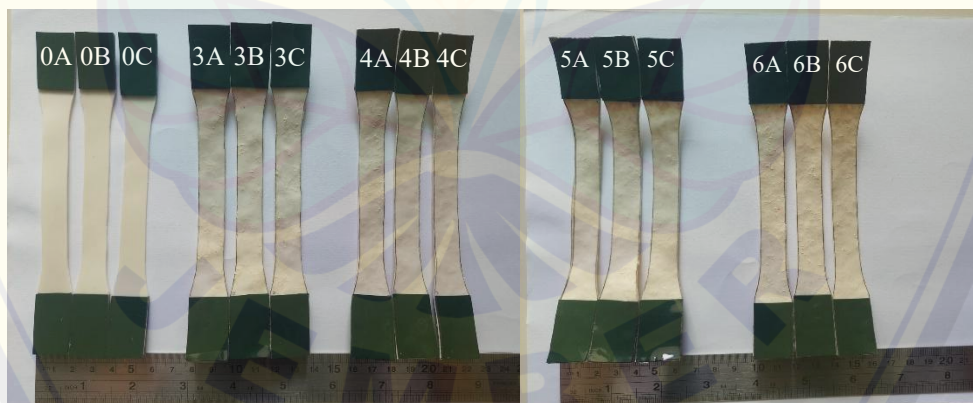
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Biokomposit

Biokomposit pada penelitian ini terdiri dari PLA sebagai matriks utama, pati jagung sebagai filler, dan serat sabut kelapa sebagai penguat alami. Penambahan pati jagung berfungsi untuk meningkatkan kemampuan biodegradasi karena sifatnya yang mudah menyerap air dan lebih mudah terurai oleh mikroorganisme dibandingkan PLA. Pati dalam matriks PLA dapat mempercepat degradasi melalui peningkatan proses hidrolisis serta menyediakan sumber nutrisi bagi mikroba (Mayekar et al., 2023). Sementara itu, serat sabut kelapa berperan sebagai penguat berbasis selulosa yang tetap menjaga karakter ramah lingkungan dari biokomposit yang dihasilkan.

4.1.1 Hasil spesimen pengujian tarik ASTM D638 Tipe 1

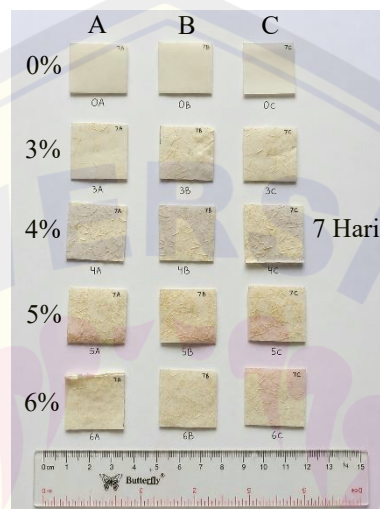
Hasil biokomposit pada gambar 4.1 merupakan spesimen uji tarik ASTM D638 yang telah dicetak sesuai standar dimensi ASTM dengan metode *solvent castin*. Seluruh variasi spesimen berhasil diproduksi tanpa mengalami cacat geometris yang signifikan sehingga layak untuk dilakukan pengujian tarik.



Gambar 4.1 Hasil Pembuatan Spesimen Uji Tarik

4.1.2 Hasil spesimen pengujian biodegradasi ASTM D5988

Spesimen uji biodegradasi ASTM D5988 pada gambar 4.2 menunjukkan kesesuaian bentuk dan dimensi dengan standar pengujian yang digunakan. Seluruh sampel berhasil dikondisikan dan dikubur pada media tanah tanpa mengalami kerusakan awal sebelum proses biodegradasi dilakukan.



Gambar 4.2 Hasil Pembuatan Spesimen Uji Biodegradasi

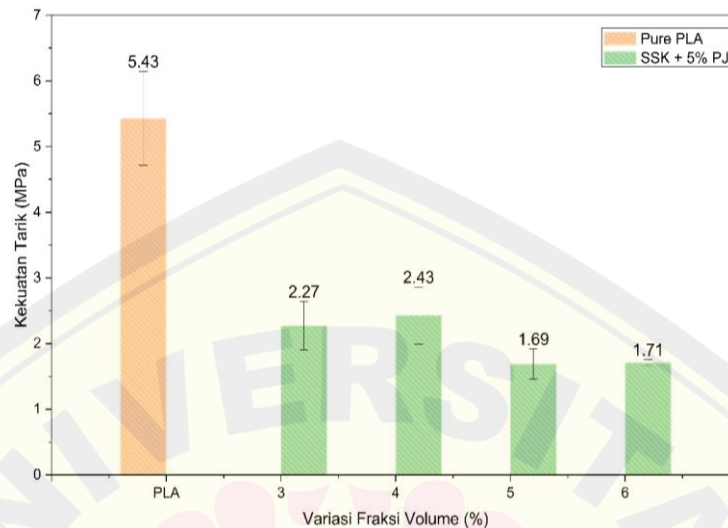
4.2 Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui hasil dari nilai kekuatan tarik PLA dan biokomposit PLA yang ditambah pati jagung serta sorbitol dan serat sabut kelapa sebagai bahan pengisinya. Pengujian tarik dilakukan di Fakultas Teknik, Universitas Jember dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) yang memiliki kapasitas 1-100 kN dengan kecepatan penarikan sebesar 2 mm/menit. Pengujian tarik ini dilakukan sebanyak 3 kali untuk setiap variasi dengan total 5 variasi. Hasil dari uji tarik ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar beban maksimum yang dapat di terima oleh PLA dan biokomposit PLA

4.2.1 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik merupakan kemampuan suatu material untuk menahan beban tarik maksimum sebelum mengalami kegagalan atau patah. Parameter ini

digunakan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam mempertahankan integritas strukturnya ketika menerima tegangan tarik (Trivedi et al., 2023).



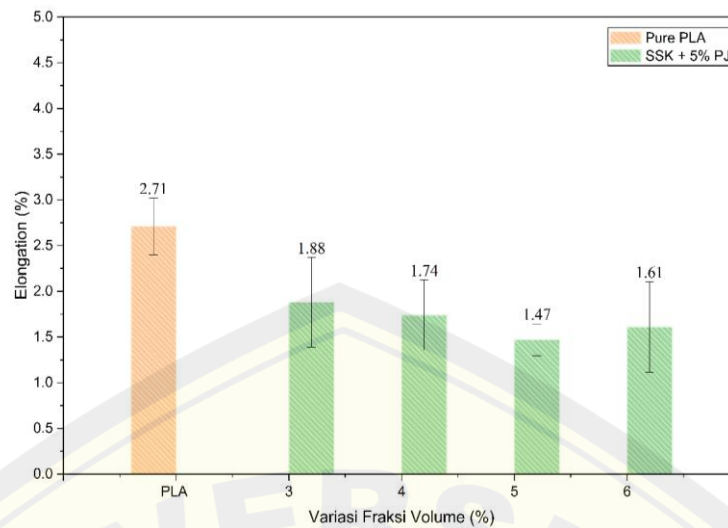
Gambar 4.3 Grafik Kekuatan Tarik

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi PLA/SSK 4% menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi di antara seluruh biokomposit, yaitu sebesar 2,43 MPa, sedangkan variasi PLA/SSK 5% menghasilkan nilai terendah sebesar 1,69 MPa. Secara umum, penambahan serat sabut kelapa hingga fraksi volume 4% masih mampu meningkatkan kekuatan tarik dibandingkan variasi 3%, namun peningkatan fraksi serat menjadi 5% dan 6% menyebabkan kekuatan tarik kembali menurun. Pola tersebut menunjukkan bahwa terdapat komposisi optimum antara matriks PLA, pati jagung, dan serat sabut kelapa sehingga penambahan serat tidak selalu memberikan peningkatan sifat mekanik. Peningkatan kekuatan tarik hanya terjadi hingga komposisi serat tertentu, sedangkan penambahan serat yang melebihi komposisi optimum justru menyebabkan penurunan kekuatan tarik akibat berkurangnya efisiensi penguatan komposit (Siakeng et al., 2020). Pada komposit PLA yang dimodifikasi menggunakan pati, peningkatan fraksi serat hanya memberikan pengaruh positif hingga komposisi tertentu. Kandungan serat yang terlalu tinggi menyebabkan struktur komposit menjadi kurang homogen sehingga kekuatan tarik mengalami penurunan (Chotiprayon et al., 2020).

Peningkatan kekuatan tarik pada variasi PLA/SSK 4% mengindikasikan bahwa jumlah serat yang ditambahkan masih dapat diakomodasi oleh matriks PLA sehingga proses transfer tegangan (*stress transfer*) dari matriks menuju serat berlangsung lebih efektif. Pada kondisi tersebut, matriks masih mampu membasahi permukaan serat sehingga kontak antarmuka yang terbentuk relatif baik dan serat dapat berfungsi sebagai penguat secara optimal. Ketika kandungan serat ditingkatkan menjadi 5% dan 6%, kemampuan matriks untuk menyelimuti seluruh permukaan serat cenderung menurun sehingga distribusi serat menjadi kurang homogen. Kondisi tersebut meningkatkan kemungkinan terbentuknya porositas, rongga antarmuka (*interfacial void*), maupun aglomerasi yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan saat spesimen menerima beban tarik (Hasan et al., 2021). Kualitas ikatan antarmuka antara matriks dan serat menjadi salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan proses stress transfer. Apabila adhesi antarmuka kurang baik, retak akan lebih mudah terinisiasi sehingga kekuatan tarik komposit menurun (Mukaffa et al., 2022). Oleh karena itu, variasi PLA/SSK 4% dapat dianggap sebagai komposisi optimum karena masih mampu menghasilkan keseimbangan antara jumlah matriks dan serat sehingga mekanisme penguatan berlangsung lebih efektif dibandingkan variasi lainnya.

4.2.2 Elongasi

Elongasi merupakan persentase pertambahan panjang material ketika menerima beban tarik hingga mengalami patah. Nilai elongasi digunakan untuk menggambarkan kemampuan material dalam mengalami deformasi sebelum terjadi kegagalan (Trivedi et al., 2023).



Gambar 4.4 Grafik Elongasi

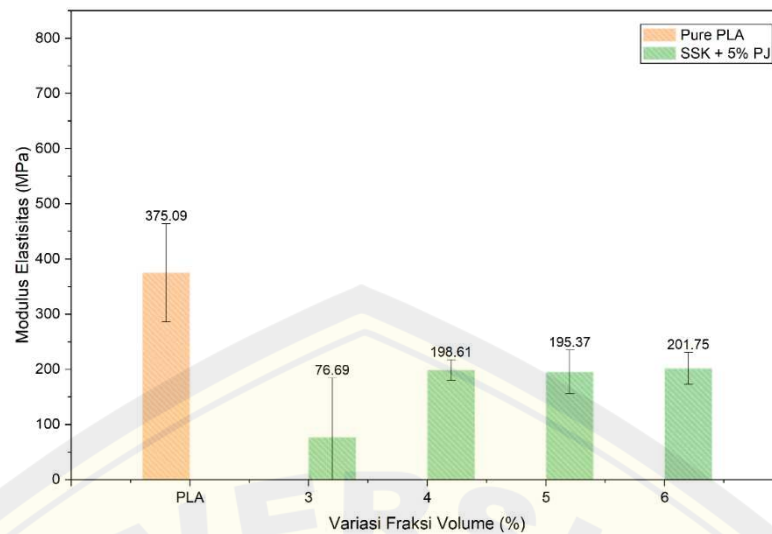
Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi PLA/SSK 4% menghasilkan nilai elongasi tertinggi di antara seluruh biokomposit, yaitu sebesar 1,57%, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi PLA/SSK 5% sebesar 1,13%. Secara umum, penambahan serat sabut kelapa hingga variasi 4% masih mampu meningkatkan kemampuan biokomposit mengalami deformasi sebelum patah, namun peningkatan kandungan serat menjadi 5% dan 6% menyebabkan nilai elongasi kembali menurun. Pola tersebut menunjukkan bahwa kemampuan deformasi material dipengaruhi oleh keseimbangan antara matriks PLA, pati jagung, dan serat sabut kelapa sehingga terdapat komposisi optimum yang masih mampu mempertahankan fleksibilitas komposit. Penambahan serat alam dalam jumlah yang sesuai dapat meningkatkan kemampuan deformasi karena matriks masih mampu mendistribusikan tegangan secara merata ke seluruh serat selama proses pembebanan (Siakeng et al., 2020). Sebaliknya, peningkatan kandungan serat yang melebihi komposisi optimum cenderung menurunkan nilai elongasi akibat berkurangnya homogenitas struktur komposit dan meningkatnya kekakuan material (Chotiprayon et al., 2020).

Nilai elongasi yang lebih tinggi pada variasi PLA/SSK 4% mengindikasikan bahwa material masih mampu mengalami deformasi sebelum terjadi kegagalan, sehingga proses perambatan retak berlangsung lebih lambat

dibandingkan variasi lainnya. Ketika kandungan serat ditingkatkan hingga 5% dan 6%, kemampuan matriks untuk mempertahankan deformasi plastis mulai berkurang sehingga spesimen mengalami patah pada regangan yang lebih rendah. Penurunan kemampuan deformasi tersebut dapat dipengaruhi oleh berkurangnya efektivitas ikatan antarmuka antara matriks dan serat sehingga distribusi tegangan menjadi kurang merata selama proses penarikan (Hasan et al., 2021). Selain itu, peningkatan fraksi serat juga menyebabkan komposit menjadi lebih kaku sehingga kemampuan material untuk mengalami perpanjangan sebelum patah semakin terbatas (Mukaffa et al., 2022). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa variasi PLA/SSK 4% masih memberikan keseimbangan yang lebih baik antara kekakuan dan fleksibilitas dibandingkan variasi serat yang lebih tinggi.

4.2.3 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kekakuan suatu material terhadap deformasi elastis ketika menerima beban. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, maka semakin besar kemampuan material untuk mempertahankan bentuknya sebelum mengalami perubahan bentuk permanen (Trivedi et al., 2023).



Gambar 4.5 Grafik Modulus Elastisitas

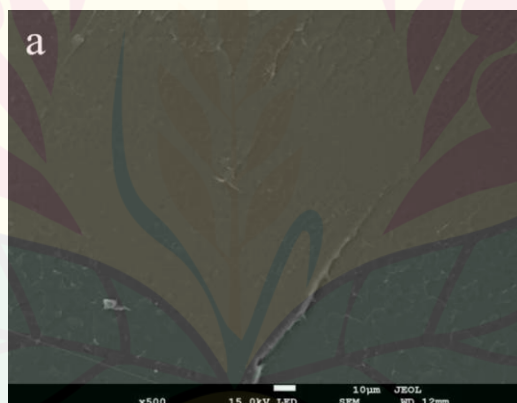
Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi PLA/SSK 6% menghasilkan nilai modulus elastisitas tertinggi di antara seluruh biokomposit, yaitu sebesar 201,75 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi PLA/SSK 3% sebesar 76,69 MPa. Secara umum, nilai modulus elastisitas mengalami peningkatan setelah penambahan serat mencapai variasi 4% hingga 6%, yang menunjukkan bahwa material menjadi lebih kaku dibandingkan variasi dengan kandungan serat yang lebih rendah. Peningkatan kekakuan tersebut mengindikasikan bahwa penambahan serat sabut kelapa mampu meningkatkan kemampuan komposit dalam menahan deformasi elastis ketika menerima pembebanan awal. Kehadiran serat alam sebagai fase penguat dapat membatasi pergerakan rantai polimer sehingga deformasi elastis material menjadi lebih kecil dan nilai modulus elastisitas meningkat (Siakeng et al., 2020). Peningkatan modulus elastisitas juga umum terjadi pada komposit berbasis PLA yang diperkuat serat alam karena serat memiliki kekakuan lebih tinggi dibandingkan matriks polimer, sehingga kontribusinya terhadap kekakuan komposit menjadi semakin besar ketika jumlah serat bertambah (Chotiprayon et al., 2020).

Meskipun variasi PLA/SSK 6% memiliki modulus elastisitas tertinggi, peningkatan kekakuan tersebut tidak diikuti oleh peningkatan kekuatan tarik maupun elongasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa material menjadi lebih sulit

mengalami deformasi elastis, tetapi kemampuan menahan beban maksimum dan regangan sebelum patah justru menurun. Bertambahnya fraksi serat menyebabkan mobilitas rantai polimer semakin terbatas sehingga komposit menjadi lebih kaku, namun pada saat yang sama material cenderung kehilangan sifat ulet (Hasan et al., 2021). Selain itu, peningkatan kekakuan tidak selalu mencerminkan kualitas struktur komposit yang lebih baik karena distribusi serat yang kurang homogen serta keberadaan cacat antarmuka dapat mengurangi efektivitas transfer tegangan ketika material menerima pembebanan (Mukaffa et al., 2022). Oleh karena itu, tingginya nilai modulus elastisitas pada variasi PLA/SSK 6% menunjukkan bahwa penambahan serat meningkatkan kekakuan material, tetapi belum tentu menghasilkan performa mekanik yang paling optimum secara keseluruhan.

4.3 Hasil Observasi dan analisis SEM

4.3.1 Morfologi PLA Murni

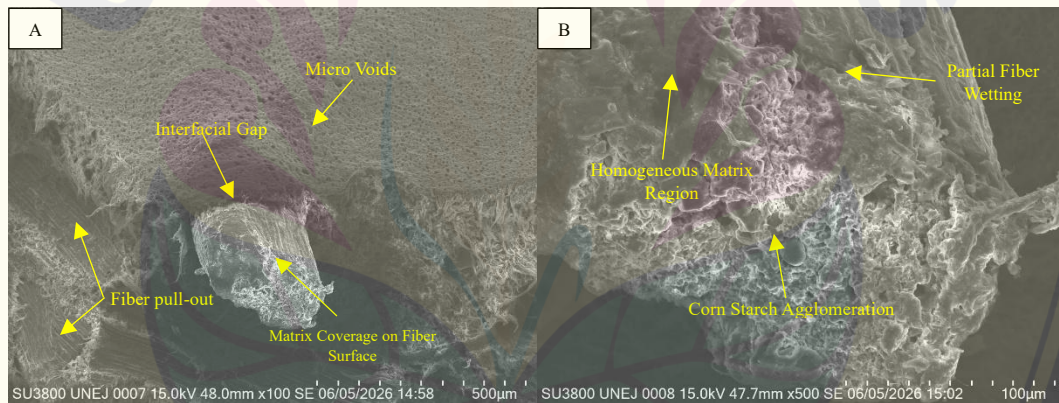


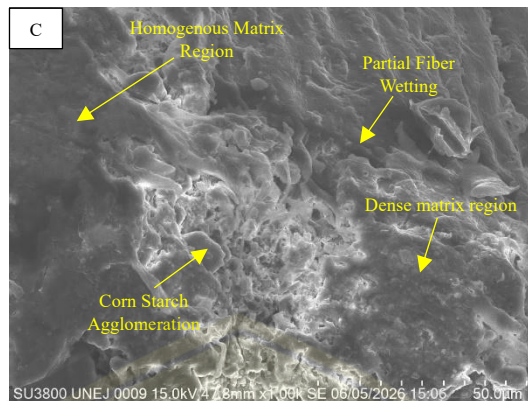
Gambar 4.6 Hasil SEM patahan PLA murni perbesaran 500x
(Sumber : Weng et al., 2025)

Karakteristik morfologi PLA murni digunakan sebagai pembanding untuk mengevaluasi perubahan struktur yang terjadi setelah penambahan pati jagung dan serat sabut kelapa pada penelitian ini. Berdasarkan hasil SEM yang dilaporkan oleh Takkalkar et al., (2019), PLA murni yang diproduksi dengan metode solvent casting menunjukkan permukaan patahan yang relatif seragam dan didominasi oleh satu fase matriks polimer tanpa adanya fase penguat maupun partikel pengisi. Struktur yang homogen tersebut menyebabkan tidak ditemukannya fenomena seperti fiber

pull-out, interfacial debonding, interfacial voids, maupun aglomerasi partikel yang umum dijumpai pada material komposit. Permukaan patahan PLA murni juga menunjukkan karakteristik patahan getas yang berasal dari mekanisme fraktur matriks polimer itu sendiri. Selain itu, tidak ditemukan rongga bekas pencabutan serat ataupun cacat antarmuka karena material hanya tersusun oleh matriks PLA tanpa tambahan filler. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Weng et al., (2025) yang menunjukkan bahwa PLA murni memiliki morfologi yang relatif homogen dan bebas dari pemisahan fase. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur mikro PLA murni lebih sederhana dibandingkan biokomposit yang mengandung pati dan serat alami. Oleh karena itu, morfologi PLA murni dapat dijadikan acuan untuk mengidentifikasi munculnya porositas, aglomerasi pati, fiber pull-out, dan berbagai cacat antarmuka pada biokomposit yang dikembangkan dalam penelitian ini.

4.3.2 Morfologi Biokomposit PLA/SSK 4%

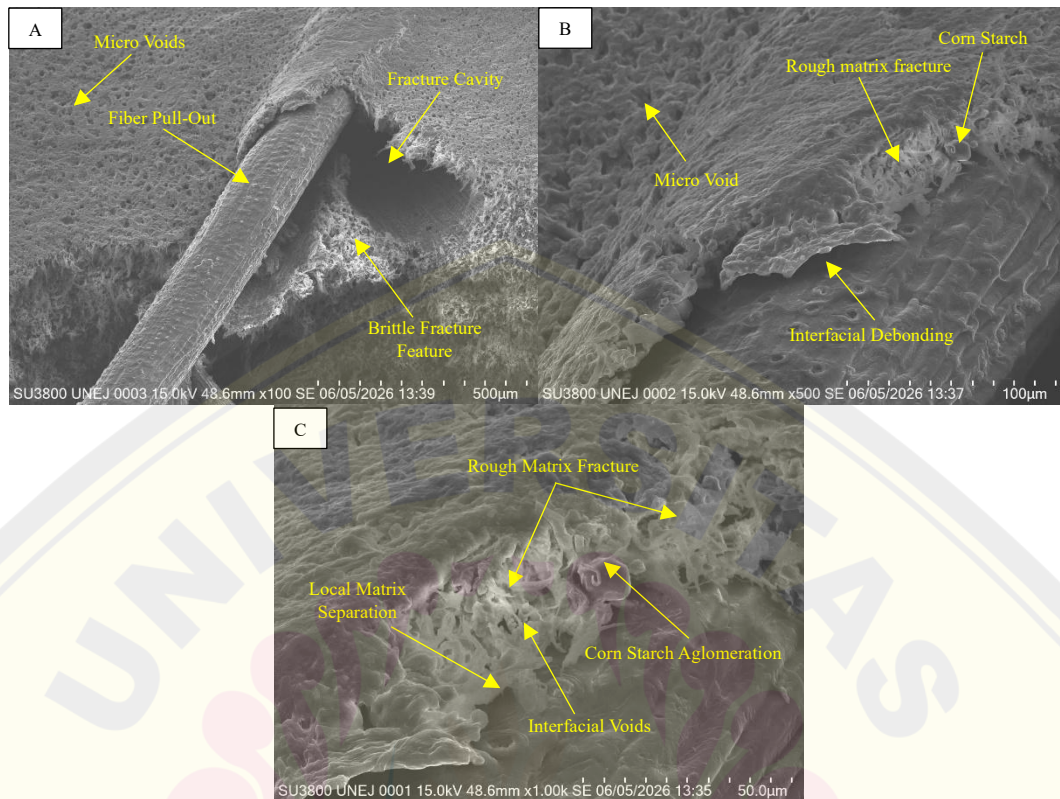




Gambar 4.7 Hasil SEM Biokomposit A) PLA/SSK 4% 100x, B) PLA/SSK 4% 500x, C) PLA/SSK 4% 1000x,

Hasil pengamatan SEM pada biokomposit PLA/SSK 5% menunjukkan jumlah cacat morfologi yang lebih banyak dibandingkan variasi 4%. Pada perbesaran 100 $\times$ terlihat adanya *fiber pull-out* yang ditandai dengan tercabutnya serat dari matriks dan meninggalkan rongga pada bekas posisi serat. Selain itu, ditemukan *fracture cavity* yang menunjukkan adanya ruang kosong akibat terlepasnya serat dari matriks saat terjadi patahan. Permukaan patahan juga menunjukkan karakteristik patahan getas (*brittle fracture*) yang ditandai dengan bentuk patahan yang tajam dan tidak mengalami deformasi yang besar. Pada perbesaran 500 $\times$ terlihat adanya *interfacial debonding*, yaitu terpisahnya serat dari matriks pada daerah antarmuka, serta pori-pori kecil yang tersebar pada permukaan material. Pengamatan pada perbesaran 1000 $\times$ menunjukkan adanya *interfacial voids*, *local matrix separation*, dan aglomerasi pati yang menandakan bahwa distribusi komponen di dalam material belum sepenuhnya merata. Menurut Siakeng et al. (2020), fenomena *fiber pull-out* dan *interfacial debonding* menunjukkan bahwa ikatan antara serat dan matriks belum terbentuk secara optimal. Selain itu keberadaan void, porositas, dan aglomerasi filler merupakan indikasi adanya ketidakseragaman struktur pada biokomposit berbasis PLA dan serat alam (Siakeng et al., 2020)

4.3.3 Morfologi Biokomposit PLA/SSK 5%

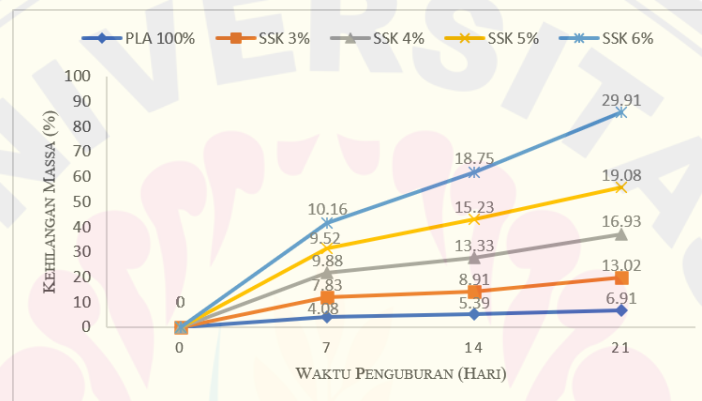


Gambar 4.8 Hasil SEM Biokomposit A) PLA/SSK 5% 100x, B) PLA/SSK 5% 500x, C) PLA/SSK 5% 1000x

Hasil pengamatan SEM pada biokomposit PLA/SSK 5% menunjukkan bahwa permukaan patahan material memiliki jumlah cacat morfologi yang lebih banyak dibandingkan variasi 4%. Pada Gambar A terlihat fenomena *fiber pull-out* yang ditandai dengan tercabutnya serat dari matriks serta terbentuknya rongga pada bekas posisi serat, yang menunjukkan bahwa sebagian serat belum berikatan secara optimal dengan matriks. Selain itu, ditemukan *fracture cavity* dan karakteristik patahan getas (*brittle fracture*) yang menunjukkan bahwa material mengalami kegagalan tanpa mengalami deformasi yang besar. Pada Gambar B memperlihatkan adanya *interfacial debonding*, yaitu pemisahan antara serat dan matriks pada daerah antarmuka, disertai permukaan patahan yang kasar (*rough fracture surface*) dan porositas pada matriks. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kontak antara serat dan matriks tidak terbentuk secara merata sehingga masih terdapat celah pada beberapa area pengamatan. Pada Gambar C ditemukan *interfacial voids*, *local*

matrix separation, dan aglomerasi pati yang mengindikasikan bahwa distribusi komponen di dalam biokomposit belum sepenuhnya homogen. Fenomena *fiber pull-out*, *interfacial debonding*, serta rongga pada daerah antarmuka merupakan indikasi bahwa transfer tegangan antara serat dan matriks tidak berlangsung secara optimal sebagaimana dijelaskan oleh Siakeng et al. (2020). Selain itu, keberadaan porositas, *void*, dan aglomerasi filler menunjukkan adanya ketidakseragaman struktur mikro material yang sejalan dengan hasil penelitian Barrera et al. (2024)

4.4 Hasil Pengujian Biodegradasi



Gambar 4.9 Hasil Uji Biodegradasi

Berdasarkan grafik, kehilangan massa seluruh sampel meningkat seiring bertambahnya waktu penguburan dari 0, 7, 14, hingga 21 hari. PLA 100% menunjukkan kehilangan massa paling rendah, yaitu sekitar 11,36% pada hari ke-7 dan 13,19% pada hari ke-21. Sebaliknya, sampel dengan penambahan SSK menunjukkan kehilangan massa lebih tinggi, dengan nilai tertinggi pada SSK 6% sebesar 17,27% pada hari ke-7, 20,88% pada hari ke-14, dan 25,70% pada hari ke-21. Tren ini menunjukkan bahwa semakin tinggi penambahan serat sabut kelapa, semakin besar laju degradasi material selama penguburan, yang sejalan dengan temuan bahwa biokomposit PLA dengan penguat lignoselulosa mengalami weight loss lebih tinggi dibandingkan PLA murni setelah soil burial (Yetiş et al., 2023).

Peningkatan kehilangan massa pada komposit PLA–pati jagung–serat sabut kelapa dapat dijelaskan oleh sifat hidrofilik filler alami yang mempermudah penyerapan air ke dalam struktur material. Air yang masuk melalui area antarmuka

matriks–filler dapat mempercepat hidrolisis rantai ester pada PLA, sehingga material lebih mudah mengalami pemutusan rantai dan pelepasan massa. Selain itu, keberadaan pati juga dapat meningkatkan biodegradasi PLA karena pati memperbesar kemampuan material menyerap air dan mendukung aktivitas mikroorganisme selama proses penguraian (Mayekar et al., 2023). Dengan demikian, SSK 6% menjadi variasi dengan biodegradasi paling cepat, sedangkan PLA 100% paling lambat karena struktur matriksnya lebih rapat dan tidak memiliki banyak jalur difusi air dari filler alami.

4.5 Aplikasi *Disposable Tableware*

Biokomposit berbasis PLA, pati jagung, dan serat sabut kelapa pada penelitian ini memiliki potensi untuk digunakan sebagai material *disposable tableware* karena bersifat biodegradable dan berasal dari bahan terbarukan. Penggunaan PLA sebagai material dasar banyak diaplikasikan pada produk kemasan dan peralatan makan sekali pakai karena memiliki kemampuan terurai di lingkungan kompos serta berasal dari sumber hayati yang dapat diperbarui (Surendren et al., 2022). Selain itu, produk *single-use tableware* berbasis biopolimer seperti PLA dapat terdegradasi lebih cepat dibandingkan plastik konvensional sehingga berpotensi mengurangi akumulasi limbah plastik di lingkungan (Chaabane et al., 2022). Meskipun hasil uji tarik menunjukkan penurunan kekuatan dibandingkan PLA murni, material biokomposit yang dihasilkan masih sesuai untuk aplikasi dengan beban rendah seperti peralatan makan sekali pakai yang menekankan aspek keberlanjutan lingkungan.



Gambar 4.10 *Disposable Tableware*