

Kekuatan Tarik dan Biodegradabilitas Biokomposit PVA berpengisi Serbuk Kulit Kacang Tanah sebagai Separator Baterai

Revvan Rifada Pradiza^{1*}, Juniar Maulana Soliwi Putra²⁾, Silvi Istiqomah³⁾, ¹Dwi Heru Siswanto⁴⁾, ¹Alfi Hasan⁵⁾, ²Mochamad Asrofi⁶⁾, ¹Yayang Permadi⁷⁾, ¹Deny Tomy Andrianto⁸⁾, ⁴Ananda Yuman Hardiansyah⁹⁾

^{1,4,5,6,7,8)}Teknologi Mesin, Politeknik Internasional Tamansiswa Mojokerto

²⁾ Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember

³⁾ Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom, Bandung

⁴⁾ Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

revvanrifada1@gmail.com^{1*}, juniarmaulana17@gmail.com²⁾,

silviistiqomah@telkomuniversity.ac.id³⁾, dwiherusiswanto@gmail.com⁴⁾,

alfihasan32@gmail.com⁵⁾, asrofi.teknik@unej.ac.id⁶⁾, yayangpolitama@gmail.com⁷⁾,

denytomyandrianto@gmail.com⁸⁾, yuman815@gmail.com⁹⁾

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan serbuk kulit kacang tanah terhadap sifat mekanik dan biodegradabilitas biokomposit berbasis Polyvinyl Alcohol (PVA) yang memiliki potensi aplikasi sebagai separator baterai. Biokomposit dibuat dengan penambahan pengisi serbuk kulit kacang tanah sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6%, yang dicampurkan dengan matriks PVA menggunakan metode solution casting. Pengujian kekuatan tarik dilakukan sesuai dengan standar ASTM D882, sementara pengujian biodegradabilitas menggunakan ASTM D6003-96. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk kulit kacang tanah meningkatkan kekuatan tarik biokomposit seiring bertambahnya fraksi pengisi. Biokomposit dengan 6% serbuk kulit kacang tanah menghasilkan kekuatan tarik maksimum sebesar 5,67 MPa. Hasil ini dibuktikan dengan hasil penyerapan kelembaban pada penambahan 6% serbuk kulit kacang tanah yang memiliki hasil terendah, sehingga gugus O-H yang terbebas berkurang. Selain itu, hasil uji biodegradasi menunjukkan bahwa semakin tinggi serbuk kulit kacang tanah, semakin besar pula laju degradasi biokomposit, dengan penurunan berat tertinggi sebesar 62,70% pada sampel dengan 6% pengisi setelah 15 hari penguburan. Temuan ini menunjukkan bahwa serbuk kulit kacang tanah berpotensi meningkatkan sifat mekanik dan biodegradabilitas biokomposit, menjadikannya alternatif ramah lingkungan untuk bahan separator baterai.

Kata kunci : *Biokomposit, Polyvinyl Alcohol (PVA), Serbuk kulit kacang tanah, Kekuatan tarik, Biodegradabilitas.*

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan berkembangnya teknologi baterai dan kebutuhan akan solusi ramah lingkungan. Aplikasi dari separator baterai berbahan dasar biokomposit semakin berkembang [1]. Separator baterai berfungsi untuk memisahkan anoda dan katoda dalam baterai untuk memungkinkan aliran ion yang efisien [2]. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, material

separator ramah lingkungan harus memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, stabilitas, dan kemampuan biodegradabilitas yang baik [3]. Biokomposit merupakan material baru dan ramah lingkungan yang didapatkan dari penggabungan dua material atau lebih untuk mendapatkan material baru yang memiliki keunikan pada sifatnya [4]. Biokomposit memiliki potensi untuk diaplikasikan menjadi separator baterai [5].

Biokomposit berbasis polimer memiliki keunggulan pada biodegradabilitasnya dan mudah larut dalam air [6]. Salah satu polimer yang dapat dijadikan separator baterai adalah *Polyvinyl Alcohol* (PVA).

PVA telah menjadi pilihan potensial sebagai matriks untuk biokomposit. Selain mudah larut dalam air dan memiliki biodegradabilitas, keunggulan lain yang dimiliki adalah biokompatibilitasnya yang baik, ketahanan yang tinggi terhadap minyak dan pelarut, serta sifat penghalang gas [7]. Namun, keterbatasan yang dimiliki adalah harga dan waktu dekomposisinya yang panjang di lingkungan [8]. Oleh karena itu, perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk mencari alternatif pengisi yang dapat mengoptimalkan sifat-sifat PVA. Berbagai cara telah dilakukan untuk memperbaiki sifat PVA. Salah satunya adalah memanfaatkan limbah biomassa serat alam [9]. Serat alam mengandung selulosa yang dapat memperkuat biokomposit [10]. Selulosa dari serat alam limbah kulit kacang tanah adalah salah satunya. Kandungan selulosa pada serat alam yang didapatkan dari proses delignifikasi atau alkalisasi dapat meningkatkan sifat mekanik hingga sifat fisik dari biokomposit PVA [11]. Kulit kacang tanah memiliki kandungan selulosa tinggi sebesar 36,39% selulosa, 15,64% hemi-selulosa, dan 25,01% lignin [12]. Hal tersebut merupakan potensi besar dari limbah kulit kacang tanah yang biasanya dibuang agar dapat lebih bermanfaat dengan dijadikan penguat dari biokomposit PVA.

Sebelumnya, penelitian tentang biokomposit polimer LDPE (*Low-Density Polyethylene*) yang diperkuat kulit kacang tanah dilakukan dengan memvariasikan pengisi 5%, 10%, dan 15% yang telah diberi perlakuan alkalisasi [13]. Hasil menunjukkan peningkatan kekuatan tarik hingga 75 % pada penambahan pengisi kulit kacang tanah sebesar 15%. Selain itu, penambahan kulit kacang tanah sebesar 15% menunjukkan peningkatan karakteristik termal dengan menunjukkan termal dekomposisi tertinggi dibandingkan LDPE. Hal serupa ditemukan pada

penelitian lainnya yang menunjukkan bahwa penambahan serbuk kulit kacang tanah pada matriks polimer dapat meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan terhadap beban [14]. Kulit kacang tanah dengan variasi 2 – 8% ditambahkan pada matriks epoxy dan menghasilkan peningkatan sifat mekanik hingga 20 Mpa. Fenomena tersebut menunjukkan potensi dari limbah kulit kacang tanah yang dapat dijadikan sebagai penguat dari biokomposit PVA untuk meningkatkan sifat mekanik, fisik, dan biodegradabilitasnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan serbuk kulit kacang tanah pada biokomposit PVA terhadap kekuatan tarik dan biodegradabilitas. Pemanfaatan kulit kacang tanah sebagai penguat biokomposit, khususnya PVA yang memiliki potensi diaplikasikan sebagai separator baterai masih jarang ditemukan. Selain itu, hasil penelitian ini dapat mengeksplorasi potensi aplikasinya sebagai separator baterai yang ramah lingkungan. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan, dengan memanfaatkan limbah pertanian yang melimpah.

2. METODE PENELITIAN

Material

Polyvinyl Alcohol (PVA) dengan tipe BP-24 sebagai matriks dari biokomposit didapatkan dari Chang Chun Petrochemical Co., LTD., memiliki derajat hidrolisis sebesar 89 %, densitas 1,21 g/cm³, dan kemurnian 98 %. Kulit Kacang Tanah didapatkan dari limbah pertanian lokal di Gondang, Mojokerto, Indonesia. Bahan kimia lainnya, seperti Natrium Hidroksida (NaOH), didapatkan dari pasar kimia lokal, UD. Aneka Kimia yang berlokasi di Jember, Indonesia.

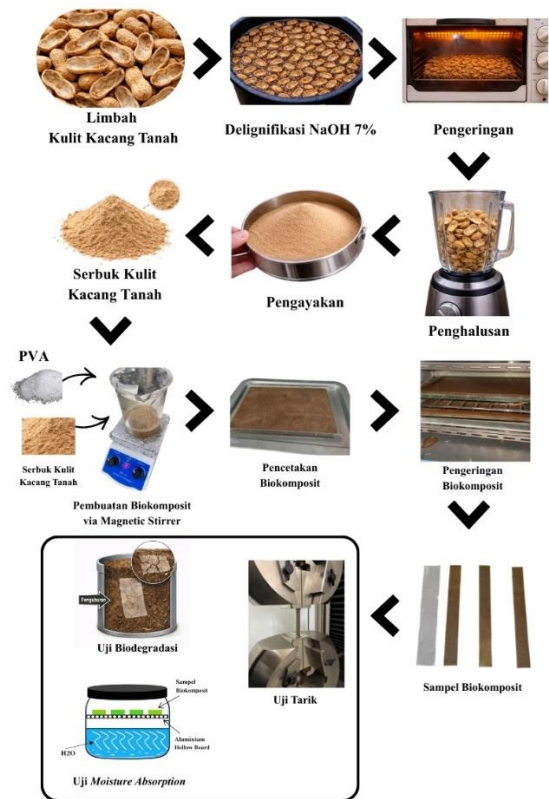
Persiapan Pengisi Serbuk Kulit Kacang Tanah

Limbah Kulit kacang tanah dikeringkan hingga berat konstan dalam oven pada suhu 90°C selama 12 jam. Pengolahan selanjutnya dilakukan proses delignifikasi

melalui perlakuan alkalisasi selama 2 jam, dimana perendaman menggunakan larutan NaOH 7% kepada kulit kacang tanah untuk menghilangkan lignin dan pengotor. Setelah delignifikasi selesai, serat dilakukan pengeringan dengan suhu 70°C hingga berat konstan dan dimasukkan *blender* hingga membentuk serbuk. Serbuk kulit kacang tanah yang sudah halus disaring menggunakan saringan besi 80 mesh dan 100 mesh. Serbuk lolos pengayakan 80 mesh dilanjutkan pada 100 mesh. Serbuk yang dipakai penguat dari biokomposit adalah serbuk yang tidak lolos 100 mesh. Ukuran partikel yang didapatkan adalah 149-177µm. Hal ini dilakukan untuk mempertahankan keseragaman partikel dari serbuk kulit kacang tanah.

Persiapan Sampel Biokomposit

Pembuatan sampel biokomposit dilakukan dengan metode *solution casting*. Keseluruhan proses pembuatan sampel biokomposit hingga pengujian tersaji pada Gambar 1. Proses pembuatan sampel dimulai dengan mlarutkan PVA menggunakan akuades kemudian diaduk menggunakan hot plate magnetic stirrer pada suhu 90 °C selama 1 jam menggunakan pengaduk dengan kecepatan 500 rpm hingga terjadi gelatinisasi. Kemudian, menambahkan pengisi serbuk kulit kacang tanah sesuai dengan komposisi yang tersaji pada Tabel 1. Selanjutnya, larutan diaduk menggunakan hot plate magnetic stirrer pada suhu 70°C selama 40 menit dengan kecepatan 400 rpm. Hasil pembuatan larutan yang berbentuk hydrogel dituang ke dalam cetakan kaca dan dikeringkan dalam oven pada suhu 40 ° C selama 24 jam. Film biokomposit yang keringkan dipotong sesuai dengan standar ASTM D882 berdasarkan penelitian sebelumnya [15].



Gambar 1. Skema Pembuatan Biokomposit

Tabel 1. Komposisi Biokomposit

<i>Sampel Biokomposit</i>	<i>Polyvinyl Alcohol (%)</i>	<i>Serbuk Kulit Kacang Tanah (%)</i>
PVA	100	0
PVA/KKT2	98	2
PVA/KKT4	96	4
PVA/KKT6	94	6

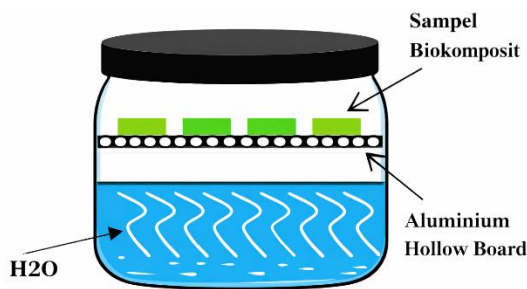
Kekuatan Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk menentukan sifat mekanik, yaitu kekuatan tarik dari biokomposit PVA dengan penguat serbuk kulit kacang tanah. Hasil yang didapatkan adalah kekuatan tarik dan nilai perpanjangan sampel saat putus. Alat uji yang digunakan adalah HT2402 *Computer Universal Testing Machine* berkapasitas 5 kN. Kecepatan penarikan yang digunakan adalah 10 mm/min dengan temperatur ruangan [16]. Untuk mendapatkan keseragaman data, setiap variasi memiliki 3 replikasi untuk diuji.

Pengujian *Moisture Absorption*

Moisture Absorption merupakan pengujian untuk mengetahui penyerapan kelembaban dari biokomposit. Sampel yang diuji berukuran 2 cm x 2 cm yang dilakukan pengeringan dengan oven hingga mencapai berat konstan. Berat awal dan akhir dicatat sebagai (W_0) dan berat akhir sebagai (W_t). Berat akhir (W_t) diperoleh dengan menimbang sampel setiap 30 menit. Proses penyerapan kelembaban dilakukan dalam ruang dengan kelembaban relatif (RH) 99% pada suhu 25°C. Gambar 2 menunjukkan skema pengujian penyerapan kelembaban. Persentase penyerapan kelembaban dihitung menggunakan persamaan yang disajikan dalam Persamaan (1), sebagaimana dilaporkan sebelumnya dalam penelitian sebelumnya [17].

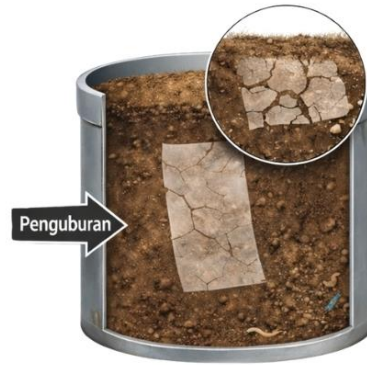
$$MA (\%) = [((W_t - W_0) / W_0) \times 100] \quad (1)$$



Gambar 2. Skema Pengujian *Moisture Absorption*

Pengujian Biodegradasi

Pengujian biodegradasi merupakan salah satu metode untuk menentukan laju dekomposisi biokomposit dengan metode penguburan dalam tanah. Biokomposit PVA dengan penguat serbuk kulit kacang tanah diuji menggunakan standar ASTM D6003-96 untuk komposit plastik [18]. Sebelum dilakukan penguburan selama 0, 5, 10, dan 15 hari, sampel ditimbang terlebih dahulu dan dilakukan peimbangan kembali sesuai variasi hari. Tanah yang digunakan memiliki spesifikasi berupa 25% nitrogen, 7% fosfor, 9% kalium, 3,7% besi, 55,3% nutrisi lain, dan pH tanah 6. Skema pengujian biodegradasi tersaji pada Gambar 3.



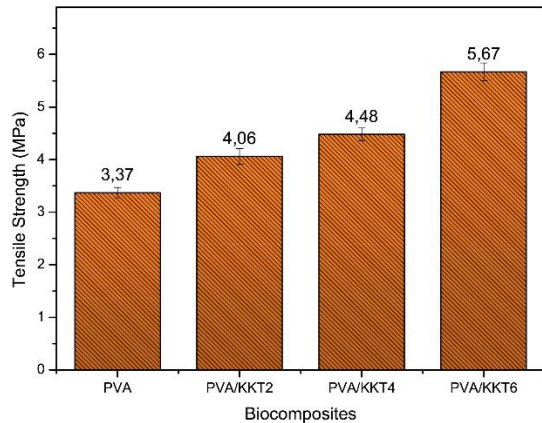
Gambar 3. Skema Pengujian Biodegradasi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Mekanik

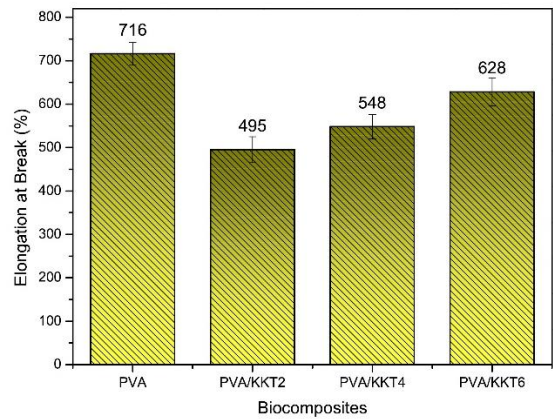
Sifat mekanik pada penelitian ini terdefiniskan dengan kekuatan tarik dan *elongation at break* (perpanjangan saat putus). Hasil dari pengujian tarik pada penelitian ini tersaji pada Gambar 4. Nilai kekuatan tarik dari biokomposit meningkat seiring dengan bertambahnya persentase pengisi serbuk kulit kacang tanah. Fenomena ini terjadi karena adanya adhesi yang baik pada antarmuka dari matriks dan serat [19]. Kekuatan tarik tertinggi dengan keadaan optimum ditunjukkan pada variasi dengan penambahan 6% pengisi serbuk kulit kacang tanah sebesar 5,67 MPa. Setelah penambahan pengisi serat alam, rantai polimer menjadi kurang bergerak karena meningkatnya jumlah hidrogen kuat ikatan yang dihasilkan dari fraksi yang lebih tinggi dari serat terdispersi dalam matriks [20]. Karena faktor tersebut, penambahan serat alam meningkatkan sifat mekanik dari film biokomposit [21]. Hal ini sejalan dengan penelitian lain yang menambahkan selulosa pada PVA yang diaplikasikan sebagai separator baterai dengan peningkatan kekuatan tarik hingga 70% [22]. Temuan ini diperkuat dengan temuan lain pada penambahan biji mangga pada matriks PVA, dimana mengalami peningkatan kekuatan tarik dari 2,32 MPa menjadi 3,95 MPa [23]. Hal ini didukung dengan hasil penyerapan kelembaban, dimana PVA berpengisi 6% serbuk kulit kacang tanah memiliki penyerapan kelembaban terendah. Penyerapan kelembaban yang rendah mengindikasikan

sedikitnya porositas sehingga mencegah terisi dengan air. Porositas yang terdapat pada sampel dapat menurunkan kekuatan tarik dari biokomposit [24]. Hasil ini menunjukkan potensi yang baik untuk separator baterai, biokomposit PVA berpengisi serbuk kulit kacang tanah memiliki hasil yang kompetitif dengan penelitian sebelumnya dengan aplikasi yang sama berupa separator baterai.



Gambar 4. Grafik kekuatan tarik biokomposit PVA berpenguat serbuk kulit kacang tanah

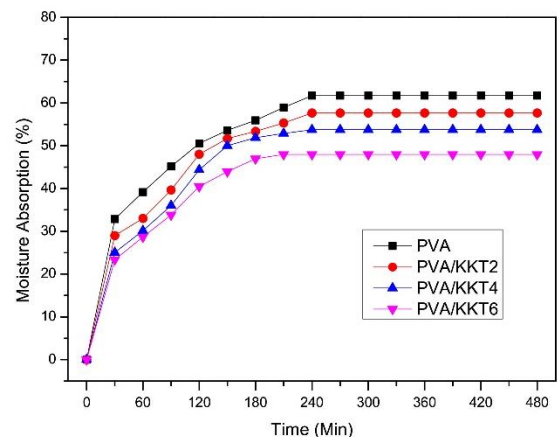
Fenomena lain ditunjukkan pada nilai elongation at break atau perpanjangan putus yang tersaji pada Gambar 5. Nilai *elongation at break* tertinggi ditemukan pada variasi PVA murni. Temuan ini sejalan dengan penelitian lain yang memanfaatkan ampas kopi sebagai penguat PVA memiliki nilai *elongation at break* tertinggi [8]. Namun, penurunan signifikan pada nilai elongasi terjadi saat serat ditambahkan. Nilai *elongasi* berkurang karena rendahnya keuletan lignin yang terdapat pada serat terhadap PVA [25]. Hal ini menunjukkan penambahan serat tidak memberikan peningkatan pada nilai elongasi. Penurunan elongasi ini juga didukung oleh penelitian serupa yang memanfaatkan *cellulose nanofiber* sebagai pengisi dari matriks PVA yang menunjukkan nilai elongasi menurun sampai 266% [26]. Fenomena ini terjadi karena ikatan hidrogen yang kurang kuat dan ulet, sehingga menghambat pergerakan rantai polimer dan mengurangi fleksibilitas [27].



Gambar 5. Grafik nilai elongasi tarik biokomposit PVA berpenguat serbuk kulit kacang tanah

Moisture Absorption

Gambar 6 menampilkan hasil pengujian *moisture absorption* dari biokomposit. Terjadi penyerapan kelembaban secara signifikan selama 90 menit pertama, diikuti dengan kestabilan setelah 240 menit.



Gambar 6. Grafik nilai penyerapan kelembaban biokomposit PVA berpenguat serbuk kulit kacang tanah

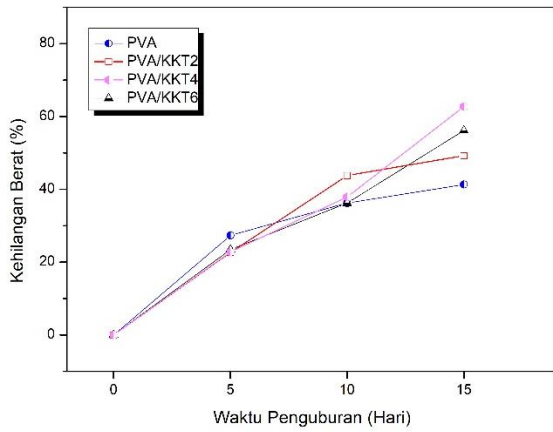
Nilai penyerapan air tertinggi untuk masing-masing film PVA, PVA/KKT2, PVA/KKT4, dan PVA/KKT6 adalah 61,70%, 57,67%, 53,74%, serta 47,93%. PVA menunjukkan tingkat penyerapan air yang tinggi karena sifat hidrofilik yang lebih tinggi dari serat alam [28]. Selain itu, faktor-faktor yang berkontribusi pada penyerapan air yang tinggi pada sistem PVA murni adanya kelompok O-H bebas. Gugus O-H yang terbebas memungkinkan air mengisi ruang kosong di dalam film [29]. Ketika dilakukan penambahan 2%

pengisi serbuk kulit kacang tanah, penyerapan air berkurang. Fenomena ini menguntungkan karena penambahan serbuk kulit kacang tanah dapat mengurangi penyerapan air. Penyerapan kelembaban berpengaruh terhadap kekuatan tarik dari biokomposit. Hal ini dibuktikan dengan penyerapan kelembaban paling rendah diperoleh pada biokomposit PVA dengan penambahan 6% serbuk kulit kacang tanah yang menghasilkan kekuatan tarik tertinggi dibanding sampel biokomposit lain. Penurunan jumlah kelompok O-H bebas setelah ditambahkan pengisi serat alam menyebabkan penurunan kemampuan difusi molekul air, sehingga interaksi antara PVA dengan serat semakin ulet [30]. Kombinasi PVA dan serat meningkatkan kompatibilitas antara komponen-komponen ini, sehingga menurunkan penyerapan kelembaban secara keseluruhan [26]. Namun, separator tetap perlu adanya porositas, porositas inilah yang menjadi tempat air tersesap. Angka porositas terendah pada penelitian ini adalah 47,93%, dimana angka tersebut masih cukup tinggi. Hal ini baik bagi separator, karena porositas separator yang tinggi bermanfaat untuk penyerapan elektrolit, sehingga meningkatkan konduktivitas ionik dan mengurangi resistansi antarmuka [31]. Separator perlu memiliki sifat mekanik yang baik, tapi dengan nilai porositas yang optimal. Temuan serupa ditemukan pada campuran yang melibatkan pati gandum dan serat aren [32]. Penambahan serat meningkatkan ketahanan air secara efektif, namun beban tertentu dapat mengurangi efek ini jika porositas dalam matriks pati meningkat, menyebabkan difusi air yang lebih besar. Selain itu, tren serupa didapatkan pada penambahan serat durian yang mengurangi penyerapan air pada komposit berbasis PVA [33]. Penyerapan air menyebar melalui film hidrofilik tetapi berkurang seiring peningkatan persentase serat hidrofilik. Hasil yang menunjukkan penurunan penyerapan kelembaban setelah penambahan serat sejalan dengan berbagai studi [33], [34].

Biodegradabilitas

Biodegradabilitas pada penelitian ini didapatkan setelah melakukan pengujian biodegradasi. Pengujian dilakukan dengan melakukan penimbangan pada setiap interval 5 hari dan dihitung persentase kehilangan beratnya. Pada Gambar 7, tersaji hasil uji biodegradasi biokomposit PVA berpengisi serbuk kulit kacang tanah. Berdasarkan hasil pengujian, laju kehilangan berat meningkat seiring dengan peningkatan kandungan pengisi serbuk kulit kacang tanah. Tingkat biodegradasi tertinggi ditemukan pada penambahan 6% pengisi serbuk kulit kacang tanah, yaitu 62,70% (tersaji pada Tabel 2). Hasil ini serupa dengan studi sebelumnya, di mana komposisi kulit lemon dengan kandungan pengisi tertinggi memiliki nilai terdegradasi sebesar 65% [15]. Hasil penelitian lain menemukan fenomena serupa, dimana serat kelapa yang dimanfaatkan sebagai pengisi PVA menghasilkan biodegradabilitas yang lebih baik dengan nilai terdegradasi sebesar 75% [32].

Mikroorganisme yang terdapat pada tanah berinteraksi dengan serat alam dan efek dari suhu dapat mempercepat dari proses biodegradasi [35]. Semakin tinggi kandungan pengisi yang tinggi meningkatkan kepekaannya terhadap reaksi dengan mikroorganisme dan bakteri [36]. Selain itu, paparan lingkungan yang lembab dapat mempengaruhi mikroorganisme seperti jamur dan bakteri bereaksi dengan film biokomposit. Sifat hidrofilik dari PVA mampu menyerap air yang terdapat pada tanah, sehingga meningkatkan laju penurunan massa saat terkubur [37]. Serat alam yang diberi perlakuan kimia juga mampu untuk mempercepat proses biodegradasi [38]. Hal ini menunjukkan bahwa PVA berpengisi serbuk kulit kacang tanah dapat mempercepat laju biodegradasi. Laju biodegradasi yang baik memiliki potensi untuk diaplikasikan menjadi *degradable separators* [39].



Gambar 7. Grafik biodegradabilitas biokomposit PVA berpengisi serbuk kulit kacang tanah

Tabel 2. Kehilangan Berat (%) pada Biokomposit PVA berpengisi Serbuk Kulit Kacang Tanah

Sampel Biokomposit	Waktu Penguburan (Hari)			
	0	5	10	15
PVA	0	27,35	36,24	41,35
PVA/KKT2	0	22,65	43,80	49,25
PVA/KKT4	0	23,45	36,25	56,15
PVA/KKT6	0	22,76	37,90	62,70

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Biokomposit dari *Polyvinyl Alcohol* (PVA) berpengisi serbuk kulit kacang tanah selesai diproduksi melalui metode *solution casting*. Penelitian ini menunjukkan penambahan serbuk kulit kacang tanah mampu meningkatkan kekuatan tarik dari biokomposit PVA. Penambahan 6% pengisi serbuk kulit kacang tanah menaikkan kekuatan tarik komposit dengan nilai tertinggi 5,67 MPa. Hal ini didukung dengan hasil pengujian *moisture absorption* terendah pada 47,93%, dimana penyerapan air mengalami penurunan yang berdampak pada berkurangnya O–H bebas dan difusi air dalam film, sehingga meningkatkan kekuatan tarik dari biokomposit. Selain itu, biodegradabilitas dari biokomposit mengalami kenaikan dengan nilai optimum tertinggi 62,70% saat 6% serbuk kulit kacang tanah ditambahkan. Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk kulit kacang tanah pada PVA dapat meningkatkan sifat mekanik tanpa

mengurangi biodegradabilitas dari PVA, dimana sifat tersebut merupakan pendukung untuk membuat *biodegradable* separator baterai. Hasil dari penelitian ini dapat dikaji lebih lanjut, khususnya pada kajian sifat termal.

Referensi

- [1] E. Lizundia and D. Kundu, “Advances in Natural Biopolymer-Based Electrolytes and Separators for Battery Applications,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 31, no. 3, p. 2005646, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202005646>.
- [2] Y. Song, L. Sheng, L. Wang, H. Xu, and X. He, “From separator to membrane: Separators can function more in lithium ion batteries,” *Electrochem. commun.*, vol. 124, p. 106948, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.106948>.
- [3] T. Zhao, P. Xiao, M. Luo, S. Nie, F. Li, and Y. Liu, “Eco-Friendly Lithium Separators: A Frontier Exploration of Cellulose-Based Materials,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 25, no. 13, 2024, doi: [10.3390/ijms25136822](https://doi.org/10.3390/ijms25136822).
- [4] M. A. B. A. Adyanto, G. Rubiono, and I. Q. Qiram, “Pengaruh Penambahan Serat Batang Pisang Kepok (*Musa Pasadisanca*) Terhadap Kuat Tekan Batako,” *V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, vol. 7, no. 2, pp. 37–40, 2022.
- [5] T. C. Turossi, H. L. O. Júnior, F. M. Monticeli, O. T. Dias, and A. J. Zattera, “Cellulose-Derived Battery Separators: A Minireview on Advances Towards Environmental Sustainability,” *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 4, 2025, doi: [10.3390/polym17040456](https://doi.org/10.3390/polym17040456).
- [6] A. Pokharel, K. J. Falua, A. Babaei-Ghazvini, and B. Acharya, “Biobased Polymer Composites: A

- Review,” *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 9, 2022, doi: 10.3390/jcs6090255.
- [7] M. Asrofi *et al.*, “Tensile strength and fracture surface analysis of polyvinyl alcohol biocomposite filled sengon wood sawdust,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1454, no. 1, p. 012013, Feb. 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1454/1/012013.
- [8] M. Asrofi *et al.*, “Mechanical Properties of Biocomposite Films Based Polyvinyl Alcohol/Potato Starch Filled by Coffee Ground Waste,” *International Journal of Agriculture and Biosciences*, vol. 13, no. 3, pp. 525–530, 2024, doi: 10.47278/journal.ijab/2024.156.
- [9] A. H. Purwono, Suhartoyo, R. Kristiono, and D. H. Putra Pradhana, “Pemanfaatan Limbah Biomassa Sebagai Bahan Bakar Ramah Lingkungan,” *V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, vol. 9, no. 1, pp. 42–46, Mar. 2024, doi: 10.36526/v-mac.v9i1.3638.
- [10] I. Qiram, G. D. Wahyudi, and A. P. Yulian Putra, “Pengembangan Teknologi Adsorber Berbahan Serat Alam dalam Mengatasi Tumpahan Minyak di Bengkulu,” *V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, vol. 8, no. 2, pp. 46–50, Oct. 2023, doi: 10.36526/v-mac.v8i2.3125.
- [11] R. Rifada Pradiza *et al.*, “1 - Introduction of natural fiber and its surface modification,” in *Surface Modification and Coating of Fibers, Polymers, and Composites*, R. Lakshminarasimhan, S. K. Palaniappan, R. Manickam, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, Eds., Elsevier, 2025, pp. 3–18. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22029-6.00001-0>.
- [12] A. Lu *et al.*, “Preparation and characterization of lignin-containing cellulose nanocrystals from peanut shells using a deep eutectic solvent containing lignin-derived phenol,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 195, p. 116415, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116415>.
- [13] P. Kumar, T. K. Maiti, A. K. Maurya, and P. Adwani, “Effect of alkali treated groundnut shell powder in the basalt fiber reinforced polyethylene hybrid composites: A sustainable approach towards green composites,” *Polym. Compos.*, vol. 44, no. 7, pp. 3952–3963, Jul. 2023, doi: 10.1002/pc.27368.
- [14] H. Fadhil, “Flexural and Impact Properties of Epoxy Composites Reinforced with Peanut Shell Particles,” *Engineering and Technology Journal*, vol. 38, no. 7, pp. 1026–1033, Jul. 2020, doi: 10.30684/etj.v38i7A.584.
- [15] R. R. Pradiza *et al.*, “Mechanical Properties and Biodegradability of Polyvinyl Alcohol and Potato Starch-Based Biocomposites with Lemon Peel Powder Filler,” *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, vol. 4, no. 3, pp. 120–130, Dec. 2025, doi: 10.56862/irajtma.v4i3.335.
- [16] M. Asrofi *et al.*, “Enhancing mechanical and thermal properties of PVA-abaca fiber biocomposites via ultrasonic vibration bath treatment,” *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103935, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103935>.
- [17] R. R. Pradiza, S. Junus, M. Asrofi, and R. A. Ilyas, “Moisture Characteristics of Biocomposites from PVA/Cassava Starch Reinforced by Lemon Peel Fiber,” *Journal of Fibers and Polymer Composites*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, Dec. 2024, doi: 10.55043/jfpc.v4i1.218.

- [18] W. Lee, J. Kim, and T. G. Lee, "Certifications and testing methods for biodegradable plastics," *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 125–146, Feb. 2025, doi: 10.1515/revce-2024-0061.
- [19] M. A. S. S. Ali, D. N. Jimat, W. M. F. W. Nawawi, and S. Sulaiman, "Antibacterial, Mechanical and Thermal Properties of PVA/Starch Composite Film Reinforced with Cellulose Nanofiber of Sugarcane Bagasse," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 47, no. 5, pp. 5747–5754, 2022, doi: 10.1007/s13369-021-05336-w.
- [20] K. Olonisakin *et al.*, "Key Improvements in Interfacial Adhesion and Dispersion of Fibers/Fillers in Polymer Matrix Composites; Focus on PLA Matrix Composites," *Compos. Interfaces*, vol. 29, no. 10, pp. 1071–1120, Oct. 2022, doi: 10.1080/09276440.2021.1878441.
- [21] Z. Fu, S. Guo, C. Li, K. Wang, Q. Zhang, and Q. Fu, "Hydrogen-bond-dominated mechanical stretchability in PVA films: from phenomenological to numerical insights," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 24, no. 3, pp. 1885–1895, 2022, doi: 10.1039/D1CP03893A.
- [22] Y. Ji, N. Liang, J. Xu, D. Zuo, D. Chen, and H. Zhang, "Cellulose and poly(vinyl alcohol) composite gels as separators for quasi-solid-state electric double layer capacitors," *Cellulose*, vol. 26, no. 2, pp. 1055–1065, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10570-018-2123-6.
- [23] M. Asrofi *et al.*, "Influence of ultrasonication time on the various properties of alkaline-treated mango seed waste filler reinforced PVA biocomposite," *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, vol. 62, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1515/rams-2023-0137.
- [24] L. Jiao-Wang, S. Charca, J. Abenojar, M. A. Martínez, and C. Santiuste, "Moisture effect on tensile and low-velocity impact tests of flax fabric-reinforced PLA biocomposite," *Polym. Compos.*, vol. 45, no. 13, pp. 11816–11828, Sep. 2024, doi: 10.1002/pc.28601.
- [25] Y. Wang, J. He, L. Zou, Y. Lu, and Y. V. Li, "High performance polyvinyl alcohol/lignin fibers with excellent mechanical and water resistance properties," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 266, p. 131244, May 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.131244.
- [26] M. Wang, X. Miao, H. Li, and C. Chen, "Effect of Length of Cellulose Nanofibers on Mechanical Reinforcement of Polyvinyl Alcohol," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 1, 2022, doi: 10.3390/polym14010128.
- [27] Z. Fu, S. Guo, C. Li, K. Wang, Q. Zhang, and Q. Fu, "Hydrogen-bond-dominated mechanical stretchability in PVA films: from phenomenological to numerical insights," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 24, no. 3, pp. 1885–1895, 2022, doi: 10.1039/D1CP03893A.
- [28] P. Sahu and M. Gupta, "Water absorption behavior of cellulosic fibres polymer composites: A review on its effects and remedies," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 51, no. 5_suppl, Jun. 2022, doi: 10.1177/1528083720974424.
- [29] B. Liu, J. Zhang, and H. Guo, "Research Progress of Polyvinyl Alcohol Water-Resistant Film Materials," *Membranes (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 347, Mar. 2022, doi: 10.3390/membranes12030347.
- [30] H. Sun, Y. Feng, B. Lei, X. Yin, and B. Wu, "Molecular simulation of the effects of water on the interface of plant fiber/polyvinyl alcohol (PVA)

- composites prepared by dry preparation method (DPM),” *J. Mol. Liq.*, vol. 391, p. 123174, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.123174.
- [31] Y. Xie, Y. Pan, and P. Cai, “Novel PVA-Based Porous Separators Prepared via Freeze-Drying for Enhancing Performance of Lithium-Ion Batteries,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 34, pp. 15242–15254, Aug. 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c02182.
- [32] A. A. B. A. Mohammed *et al.*, “Effect of sugar palm fibers on the properties of blended wheat starch/polyvinyl alcohol (PVA) - based biocomposite films,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 1043–1055, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.027>.
- [33] M. Mahardika, M. Asrofi, D. Amelia, E. Syafri, S. Mavinkere Rangappa, and S. Siengchin, “Tensile Strength and Moisture Resistance Properties of Biocomposite Films Based on Polyvinyl Alcohol (PVA) with Cellulose as Reinforcement from Durian Peel Fibers,” *E3S Web Conf.*, vol. 302, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130202001>
- [34] H. Abral, A. Hartono, F. Hafizulhaq, D. Handayani, E. Sugiarti, and O. Pradipta, “Characterization of PVA/cassava starch biocomposites fabricated with and without sonication using bacterial cellulose fiber loadings,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 206, pp. 593–601, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.054>.
- [35] P. Borelbach, R. Kopitzky, J. Dahringer, and P. Gutmann, “Degradation Behavior of Biodegradable Man-Made Fibers in Natural Soil and in Compost,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 13, p. 2959, Jul. 2023, doi: 10.3390/polym15132959.
- [36] A. Pandit and R. Kumar, “A Review on Production, Characterization and Application of Bacterial Cellulose and Its Biocomposites,” *J. Polym. Environ.*, vol. 29, no. 9, pp. 2738–2755, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10924-021-02079-5.
- [37] C. Cao, M. Cai, L. Zhao, and G. Li, “Improving Water Stability of Soil Aggregates with Polyvinyl Alcohol as a Polymeric Binder,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 13, p. 1758, Jun. 2024, doi: 10.3390/polym16131758.
- [38] M. Y. Khalid *et al.*, “Developments in Chemical Treatments, Manufacturing Techniques and Potential Applications of Natural-Fibers-Based Biodegradable Composites,” *Coatings*, vol. 11, no. 3, p. 293, Mar. 2021, doi: 10.3390/coatings11030293.
- [39] H. Yuan *et al.*, “Tartaric Acid Cross-Linking Polyvinyl Alcohol as Degradable Separators for Rechargeable Lithium Ion Batteries,” *ChemSusChem*, vol. 17, no. 19, Oct. 2024, doi: 10.1002/cssc.202400359.