



Pengaruh Fraksi Berat Partikel Serat Mesokarp Kelapa Sawit terhadap Kekuatan Tarik dan Lentur Komposit LDPE

Effect of Oil Palm Mesocarp Fiber Particle Weight Fraction on the Tensile and Flexural Strength of LDPE Composites

Dimas Eka Firmansyah^{1,a)}, Rahmat Doni Widodo¹, Muhammad Irfan Nuryanta¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang

^{a)}Corresponding author: dimasekafirmansyah@students.unnes.ac.id

Abstrak

Serat mesokarp kelapa sawit merupakan residu industri yang berpotensi dimanfaatkan sebagai pengisi komposit termoplastik. Penelitian ini menganalisis pengaruh fraksi berat partikel serat mesokarp terhadap kekuatan tarik dan lentur komposit *low-density polyethylene* (LDPE). Partikel yang lolos ayakan 200 mesh ditambahkan sebesar 0, 5, 10, dan 15 wt%. Campuran dipanaskan pada 150 °C selama 20 menit, diaduk manual setiap 5 menit, kemudian dipres selama 5 menit hingga mendingin. Tiga spesimen dari satu lempeng untuk setiap komposisi diuji tarik dan lentur. Nilai tarik tertinggi pada rentang pengujian diperoleh pada 5 wt%, yaitu $16,16 \pm 1,14$ MPa, sedangkan nilai lentur tertinggi diperoleh pada 15 wt%, yaitu $55,72 \pm 5,50$ MPa. Perbedaan respons kedua pengujian menunjukkan bahwa fraksi pengisi dan mutu pembentukan lempeng memengaruhi setiap mode pembebanan secara berbeda. Hasil ini memberikan data awal untuk pengembangan komponen LDPE non struktural dan peningkatan nilai guna residu kelapa sawit.

Kata Kunci: LDPE; serat mesokarp kelapa sawit; fraksi berat; kekuatan mekanik

Abstract

Oil palm mesocarp fiber is an industrial residue with potential as a filler in thermoplastic composites. This study analyzed the effect of mesocarp fiber particle weight fraction on the tensile and flexural strength of low-density polyethylene (LDPE) composites. Particles passing a 200-mesh sieve were added at 0, 5, 10, and 15 wt%. The mixture was heated at 150 °C for 20 min, manually stirred every 5 min, and pressed for 5 min during cooling. Three specimens cut from one plate for each composition were tested. The highest tensile strength within the investigated range occurred at 5 wt% (16.16 ± 1.14 MPa), whereas the highest flexural strength occurred at 15 wt% (55.72 ± 5.50 MPa). The different responses indicate that filler fraction and plate-forming quality affect each loading mode differently. These findings provide preliminary data for non-structural LDPE components and oil palm residue valorization.

Keywords: LDPE; oil palm mesocarp fiber; weight fraction; mechanical strength

PENDAHULUAN

Komposit polimer dengan penguat bahan lignoselulosa dikembangkan untuk memperoleh material yang ringan, mudah dibentuk, dan dapat memanfaatkan sumber daya terbarukan atau residu pertanian. Kinerja komposit serat alam tidak hanya ditentukan oleh kekuatan serat, tetapi juga oleh jenis matriks, fraksi pengisi, ukuran dan bentuk pengisi, orientasi, kadar air, kualitas antarmuka, serta metode pemrosesan [1–11]. Variasi faktor tersebut menyebabkan hasil antar publikasi tidak selalu menunjukkan kecenderungan yang sama.

Serat mesokarp kelapa sawit merupakan residu padat yang terpisah dari buah pada pengolahan minyak sawit. Material ini mengandung komponen lignoselulosa dan memiliki permukaan serta komposisi yang dipengaruhi oleh sumber bahan dan proses pemisahan [5,12,13]. Pemanfaatannya sebagai pengisi polimer dapat mengurangi volume residu sekaligus menghasilkan bahan komposit bernilai tambah. LDPE dipilih sebagai matriks karena memiliki densitas rendah, ketahanan kimia yang baik, dan suhu pemrosesan yang relatif rendah. Sifat mekaniknya sangat dipengaruhi oleh struktur molekul,

kristalinitas, kondisi termal, dan riwayat pemrosesan [14,15]. Pada komposit LDPE–serat alam, perbedaan polaritas antara permukaan lignoselulosa yang hidrofilik dan *poliolefin* yang *hidrofobik* dapat membatasi pembasahan dan adhesi antarmuka. Perlakuan permukaan, *silane*, atau *compatibilizer* dapat memperbaiki interaksi pada sejumlah sistem, tetapi pengaruhnya bergantung pada bahan dan kondisi proses [11,12,16–21].

Penelitian yang paling dekat dengan kajian ini memperlihatkan adanya perbedaan respons. Olusunmade dkk. [22] menggunakan partikel serat mesokarp sekitar 300 μm pada LLDPE dengan fraksi 5–25 wt% dan melaporkan peningkatan *modulus* serta kekerasan, tetapi kekuatan tarik menurun ketika fraksi serat bertambah. Guedes dkk. [23] memproses palm fiber/LDPE melalui pencampuran *termokinetik* dan *injection molding* pada fraksi 5–20 wt% serta memperoleh perubahan sifat yang dipengaruhi komposisi. Pada sistem jute/LDPE, *dioum*/LDPE, dan selulosa/LDPE, penambahan pengisi juga dapat meningkatkan atau menurunkan kekuatan, bergantung pada perlakuan serat, ukuran, fraksi, dan kualitas pencampuran [24–28].

Rute pemrosesan merupakan sumber perbedaan penting. Ukuran pengisi yang lebih kecil memperbesar luas permukaan yang harus dibasahi matriks, sedangkan jumlah pengisi yang lebih tinggi meningkatkan viskositas campuran dan peluang kontak antar pengisi. Metode pencampuran, tekanan, suhu, waktu penahanan, dan pendinginan menentukan pemadatan, orientasi, rongga, serta konsistensi geometri lempeng [29–33]. Karena itu, nilai mekanik dari proses manual tidak dapat langsung dibandingkan dengan hasil ekstrusi, *injection molding*, atau *compression molding* yang parameter prosesnya dikendalikan secara lebih ketat.

Penelitian terdahulu telah mengkaji serat mesokarp pada termoplastik, tetapi data mengenai partikel serat mesokarp sangat halus yang lolos ayakan 200 *mesh*, fraksi rendah 0–15 wt%, pemanasan bersama, serta pengujian tarik dan lentur pada satu sistem LDPE masih terbatas. Kebaruan penelitian ini adalah evaluasi deskriptif dua mode pembebanan pada komposit LDPE tanpa perlakuan kimia dan tanpa *compatibilizer* yang dibentuk dengan pemanasan dan pengepresan manual. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh fraksi berat partikel serat mesokarp terhadap kekuatan tarik dan lentur komposit LDPE serta mengidentifikasi komposisi yang memberikan nilai tertinggi pada rentang yang diuji. Hasilnya diarahkan sebagai data awal untuk panel, pelapis, atau bagian interior nonstruktural yang tidak menerima beban keselamatan kritis [8,34,35].

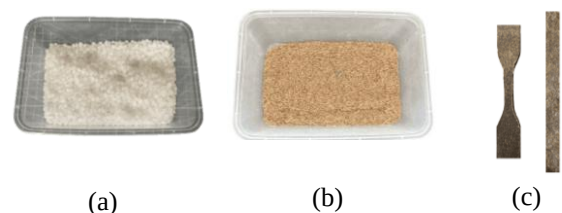
METODE PENELITIAN

Rancangan penelitian

Penelitian menggunakan rancangan eksperimen satu faktor, yaitu fraksi berat partikel serat mesokarp sebesar 0, 5, 10, dan 15 wt%. Untuk setiap komposisi dibuat satu lempeng komposit. Tiga spesimen tarik dan tiga spesimen lentur dipotong dari lempeng yang sama. Dengan demikian, ketiga spesimen merupakan pengulangan di dalam lempeng, bukan tiga replikasi proses fabrikasi yang independen. Data dianalisis secara deskriptif menggunakan nilai rata-rata, standar deviasi sampel, rentang, dan perubahan relatif terhadap LDPE tanpa pengisi.

Bahan dan persiapan partikel

Bahan penelitian terdiri atas pelet LDPE komersial yang diperoleh dari pemasok daring dan serat mesokarp kelapa sawit. Serat dicuci menggunakan air untuk mengurangi kotoran yang terlihat, kemudian dikeringkan pada kondisi lingkungan selama sehari semalam atau sekitar 24 jam. Suhu dan kelembapan pengeringan serta kadar air akhir tidak diukur. Serat kering dihaluskan dan diayak, fraksi yang lolos ayakan 200 *mesh* digunakan sebagai pengisi. Tidak dilakukan alkalisasi, perlakuan kimia, atau penambahan *compatibilizer*. Oleh karena ukurannya halus, bahan penguat selanjutnya disebut partikel serat *mesokarp*. Bahan dan bentuk spesimen diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bahan dan spesimen: (a) pelet LDPE; (b) partikel serat mesokarp; (c) spesimen tarik dan lentur

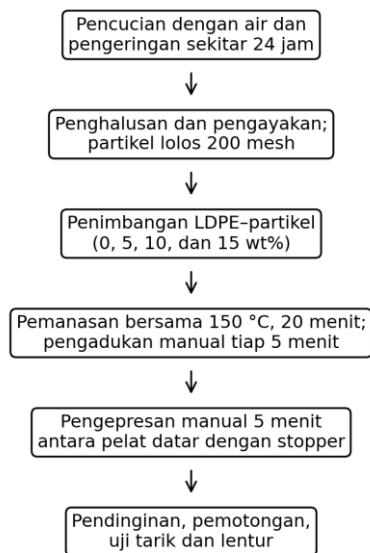
Komposisi dan fabrikasi lempeng

Komposisi dinyatakan sebagai fraksi berat (*weight fraction*), karena bahan ditimbang berdasarkan massa. Rincian komposisi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi komposit LDPE–partikel serat *mesokarp*

Kode	LDPE (wt%)	Partikel serat (wt%)	Jumlah spesimen per uji
M0	100	0	3
M5	95	5	3
M10	90	10	3
M15	85	15	3

LDPE dan partikel serat ditimbang sesuai komposisi, ditempatkan dalam wadah, kemudian dipanaskan bersama pada 150 °C selama 20 menit. Campuran diaduk secara manual setiap 5 menit, sehingga dilakukan pengadukan pada beberapa interval selama pemanasan. Setelah pemanasan, material diletakkan di antara pelat bawah dan pelat penekan yang permukaannya rata. Material ditekan dengan pres hidrolik manual, sedangkan *stopper* digunakan untuk membatasi ketebalan lempeng. Tekanan dipertahankan selama 5 menit hingga lempeng mendingin; besar tekanan dan laju pendinginan tidak direkam. Tahapan proses diringkas pada Gambar 2. Pengaruh ukuran pengisi dan parameter pembentukan terhadap struktur serta sifat termoplastik telah dilaporkan pada berbagai sistem [29–33].



Gambar 2. Alur persiapan bahan, fabrikasi lempeng, dan pengujian

Persiapan dan pengujian spesimen

Lempeng komposit dilepas setelah dingin dan dipotong secara manual menjadi spesimen tarik dan lentur. Pengujian dilakukan menggunakan universal testing machine (UTM) di Laboratorium Teknik Mesin UGM. Bentuk dan perhitungan kekuatan tarik dirujuk pada ASTM D638-22 [36], sedangkan pengujian lentur tiga titik dan perhitungannya dirujuk pada ASTM D790-25 [37]. Jarak antar tumpuan uji lentur ditetapkan sama untuk seluruh spesimen, yaitu 73,60 mm.

Kekuatan tarik dihitung dengan Persamaan (1).

$$\sigma_t = F_{\max} / A_0 \quad (1)$$

dengan σ_t adalah kekuatan tarik (MPa), $F_{\max}$ adalah gaya tarik maksimum (N), dan A_0 adalah luas penampang awal spesimen (mm²). Kekuatan lentur dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\sigma_f = 3PL / (2bd^2) \quad (2)$$

dengan σ_f adalah kekuatan lentur (MPa), P adalah gaya maksimum (N), L adalah jarak antartumpuan (mm), b adalah lebar spesimen (mm), dan d adalah tebal spesimen (mm). Standar deviasi dihitung dari tiga hasil dalam satu lempeng dan hanya digunakan untuk menggambarkan penyebaran internal [36–38].

HASIL DAN PEMBAHASAN

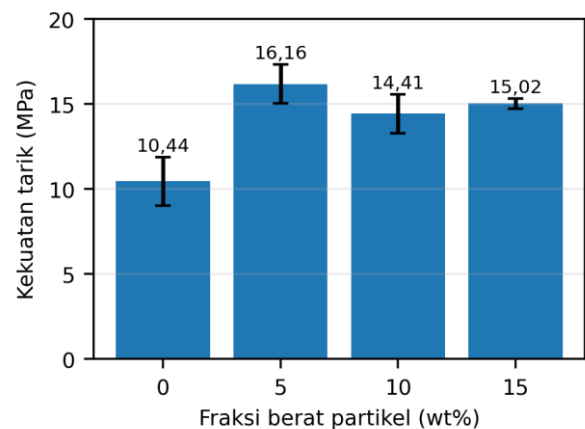
Kekuatan tarik

Tabel 2. Hasil pengujian tarik komposit

Partikel (wt%)	S1 (MPa)	S2 (MPa)	S3 (MPa)	Rata-rata ± SD (MPa)
0	8,857	11,619	10,857	10,44 ± 1,43
5	14,857	16,667	16,952	16,16 ± 1,14
10	13,143	15,333	14,762	14,41 ± 1,14
15	15,333	14,762	14,952	15,02 ± 0,29

Keterangan:

S1–S3 dipotong dari satu lempeng pada setiap komposisi



Gambar 3. Kekuatan tarik rata-rata; batang galat menunjukkan standar deviasi deskriptif

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 3, LDPE tanpa partikel menghasilkan kekuatan tarik 10,44 ± 1,43 MPa dengan rentang 8,857–11,619 MPa. Penambahan 5 wt% meningkatkan nilai rata-rata menjadi 16,16 ± 1,14 MPa, atau 54,7% di atas M0. Nilai ini merupakan kekuatan tarik tertinggi pada rentang komposisi yang diuji.

Pada kadar rendah, partikel yang tertanam di dalam matriks dapat membatasi deformasi lokal dan ikut menahan beban apabila kontak matriks–partikel cukup baik. Peningkatan tarik pada fraksi tertentu juga dilaporkan pada *palm* fiber/LDPE, *jute*/LDPE, *doum*/LDPE, serta LDPE dengan pengisi selulosa [8]–[13]. Namun, besar peningkatan tidak dapat dibandingkan hanya berdasarkan fraksi berat karena ukuran pengisi, *grade polietilena*, perlakuan permukaan, dan metode pembentukan berbeda.

Kekuatan tarik M10 sebesar $14,41 \pm 1,14$ MPa, turun 10,8% terhadap M5, sedangkan M15 sebesar $15,02 \pm 0,29$ MPa, naik 4,2% terhadap M10 tetapi tetap 7,1% di bawah M5. Seluruh komposit berpartikel masih memiliki rata-rata lebih tinggi daripada M0. Respons tersebut menunjukkan pola non linier dimana penambahan partikel dari 5 menjadi 10 atau 15 wt% tidak memberikan kenaikan yang proporsional.

Ketika fraksi partikel meningkat, luas permukaan total yang perlu dibasahi LDPE juga meningkat. Pada sistem tanpa *compatibilizer*, kondisi tersebut dapat meningkatkan kemungkinan adanya daerah dengan kontak antarmuka kurang baik atau kontak antar pengisi. Ukuran partikel, kadar pengisi, dan metode pencampuran diketahui memengaruhi dispersi serta sifat komposit termoplastik [17–20,29,30].

Dibandingkan studi Olusunmade dkk. [22], yang melaporkan penurunan kekuatan tarik OPMF/LLDPE ketika kandungan serat meningkat pada 5–25 wt%, hasil penelitian ini menunjukkan kenaikan terhadap matriks pada semua komposisi berpartikel. Perbedaan tersebut dapat berasal dari jenis *polietilena*, ukuran partikel, rentang fraksi, geometri spesimen, serta proses pemanasan dan pemadatan. Perbandingan ini memperkuat bahwa pengaruh fraksi serat tidak berdiri sendiri dan harus dibaca bersama parameter proses.

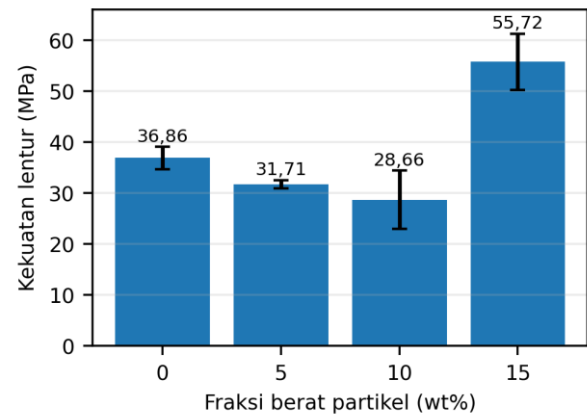
Kekuatan lentur

Tabel 3. Hasil pengujian lentur komposit

Partikel (wt%)	Sp.	P maks. (N)	Lebar b (mm)	Tebal d (mm)	σ lentur (MPa)
0	1	81,986	12,62	4,57	34,34
	2	86,787	12,21	4,54	38,07
	3	87,722	12,26	4,55	38,16
5	1	77,025	12,56	4,58	32,28
	2	75,723	12,55	4,56	32,03
	3	79,770	12,56	4,77	30,82
10	1	86,194	12,65	4,62	35,24
	2	65,679	12,47	4,77	25,56
	3	61,775	12,52	4,65	25,19
15	1	104,136	12,35	4,32	49,88
	2	159,519	15,13	4,54	56,47
	3	138,247	13,39	4,33	60,80

Keterangan:

jarak antartumpuan $L = 73,60$ mm untuk seluruh spesimen.



Gambar 4. Kekuatan lentur rata-rata; batang galat menunjukkan standar deviasi deskriptif

Pengujian lentur memiliki satu tujuan terpadu dengan hasil pada Tabel 3 dan Gambar 4, yaitu mengevaluasi kemampuan komposit ketika menahan pembebanan tiga titik dan perubahan kekuatan lentur akibat variasi fraksi partikel. M0 menghasilkan $36,86 \pm 2,18$ MPa. M5 dan M10 berturut-turut menghasilkan $31,71 \pm 0,78$ MPa dan $28,66 \pm 5,70$ MPa, sehingga berada 14,0% dan 22,2% di bawah M0. Nilai M10 memiliki penyebaran terbesar pada tiga kelompok awal, dengan rentang 25,19–35,24 MPa.

Kekuatan lentur dipengaruhi oleh respons tarik pada permukaan bawah, tekan pada permukaan atas, dan tegangan geser di bagian dalam spesimen. Selain kondisi antarmuka, hasilnya peka terhadap dimensi karena ketebalan muncul sebagai pangkat dua pada Persamaan (2). Variasi ketebalan dan posisi lokal partikel di sepanjang bentang dapat mengubah respons, terutama pada lempeng yang dibentuk dan dipotong secara manual. Literatur juga menunjukkan bahwa interpretasi kekuatan lentur komposit serat alam perlu mempertimbangkan geometri, orientasi, antarmuka, dan kondisi pengujian [37,39,40].

M15 memberikan kekuatan lentur tertinggi sebesar $55,72 \pm 5,50$ MPa atau 51,2% lebih tinggi daripada M0. Nilai individual meningkat dari 49,88 sampai 60,80 MPa. Pada komposisi ini, jumlah partikel yang lebih besar mungkin meningkatkan hambatan terhadap pembengkokan pada lokasi tertentu. Akan tetapi, lebar spesimen M15 bervariasi 12,35–15,13 mm dan standar deviasinya lebih besar daripada M0 dan M5, sehingga kesimpulan harus dibatasi pada lempeng yang diuji.

Perbandingan hasil tarik dan lentur memperlihatkan bahwa M5 memberikan nilai tarik tertinggi, sedangkan M15 memberikan nilai lentur tertinggi. Dengan demikian, tidak terdapat satu komposisi yang dapat disebut paling baik untuk seluruh sifat mekanik. Perbedaan ini dapat terjadi karena medan tegangan pada uji tarik relatif seragam pada daerah ukur, sedangkan uji lentur menghasilkan gradien tegangan melalui ketebalan dan

sensitif terhadap permukaan serta dimensi spesimen [37,39,40].

Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Tabel 4. Hasil pengujian lentur komposit

Acuan	Campuran	Fraksi/proses utama	Kecenderungan utama
[22]	OPMF/LL DPE	5–25 wt%; pembentukan manual	Modulus dan kekerasan naik; tarik menurun dengan kenaikan serat
[23]	Palm fiber/LDPE	5–20 wt%; pencampuran termokinetik dan injection molding	Sifat dipengaruhi fraksi dan proses
[24]	Jute/LDPE	Serat dengan/tanpa perlakuan kimia	Perlakuan dan fraksi memengaruhi tarik
[25]	Doum/LDPE	Serat alam pada LDPE	Sifat tarik dan termal berubah menurut fraksi
[26,27]	Selulosa/LDPE	Pulp atau mikrokristalin; metode pencampuran berbeda	Ukuran, modifikasi, dan dispersi memengaruhi kekuatan

Tabel 4 menunjukkan bahwa hasil penelitian ini tidak bertentangan secara langsung dengan studi terdahulu, tetapi berada pada kondisi bahan dan pemrosesan yang berbeda. Studi yang menggunakan pencampuran intensif, *compatibilizer*, atau *injection molding* memiliki peluang menghasilkan pembasahan dan pemadatan yang lebih konsisten. Sebaliknya, metode manual dalam penelitian ini memberikan informasi awal tentang kecenderungan komposisi, tetapi belum memisahkan pengaruh fraksi pengisi dari variasi proses.

Pengamatan makroskopis, implikasi, dan keterbatasan



Gambar 5. Tampilan makroskopis lempeng komposit: (a) 5 wt%; (b) 10 wt%; (c) 15 wt%

Gambar 5 memperlihatkan perubahan warna dan tampilan permukaan seiring kenaikan fraksi partikel. Foto makroskopis hanya mendokumentasikan penampakan permukaan; foto tersebut tidak dapat membuktikan distribusi internal, ukuran rongga, aglomerasi, *debonding*, fiber *pull-out*, atau efektivitas transfer tegangan. Analisis tersebut memerlukan mikroskopi optik, SEM, atau pencitraan tiga dimensi pada penampang dan permukaan

patahan [17–20,27,41]. Oleh karena itu, istilah diduga, mungkin, atau dapat berkaitan digunakan ketika membahas mekanisme.

Secara praktis, M5 dapat dipertimbangkan sebagai komposisi awal ketika ketahanan tarik menjadi perhatian, sedangkan M15 menunjukkan potensi ketika respons lentur lebih diprioritaskan. Rekomendasi ini hanya berlaku pada rentang dan kondisi pengujian penelitian. Sebelum digunakan untuk panel, pelapis, atau komponen interior non struktural, diperlukan evaluasi ketahanan impak, penyerapan air, penuaan, stabilitas dimensi, dan konsistensi antar *batch* [1,2,4,5,8,34,35,42].

Keterbatasan penelitian meliputi satu lempeng untuk setiap komposisi, kadar air akhir serat yang tidak diukur, proses pencampuran manual, variasi geometri spesimen, serta tidak tersedianya data lengkap pengamatan mikro struktur. Keterbatasan tersebut dapat menjelaskan sebagian penyebaran hasil dan membatasi generalisasi..

PENUTUP

Simpulan

Variasi fraksi berat partikel serat mesokarp menghasilkan respons kekuatan tarik dan lentur komposit LDPE yang tidak linier. Kekuatan tarik tertinggi pada rentang yang diuji diperoleh pada 5 wt%, yaitu $16,16 \pm 1,14$ MPa atau 54,7% di atas LDPE tanpa pengisi. Kekuatan lentur tertinggi diperoleh pada 15 wt%, yaitu $55,72 \pm 5,50$ MPa atau 51,2% di atas LDPE tanpa pengisi. M10 memberikan kekuatan lentur terendah dan penyebaran hasil yang relatif besar. Dengan demikian, komposisi yang memberikan nilai tertinggi berbeda menurut mode pembebanan dan tidak ada satu fraksi yang dapat dinyatakan optimum untuk seluruh sifat. Partikel serat mesokarp berpotensi digunakan sebagai pengisi komponen LDPE nonstruktural sekaligus meningkatkan nilai guna residu kelapa sawit, tetapi mekanisme antarmuka dan penyebab perubahan kekuatan belum dapat dipastikan tanpa analisis mikrostruktur dan replikasi proses yang independen.

Saran

Penelitian berikutnya perlu menggunakan sekurang-kurangnya tiga lempeng independen per komposisi, mengukur kadar air akhir partikel, serta mengontrol suhu, tekanan, waktu penahanan, dan laju pendinginan. Variasi ukuran partikel, *compatibilizer*, dan perlakuan permukaan perlu dibandingkan dengan bahan tanpa perlakuan. Pengamatan mikroskopi pada penampang patahan, pengujian serapan air, impak, dan penuaan diperlukan agar hubungan antara proses, struktur, dan sifat dapat dijelaskan serta aplikasi non struktural dapat dipilih secara lebih tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Asyraf MRM, Ishak MR, Syamsir A, Nurazzi NM, Sabaruddin FA, Shazleen SS, et al. Mechanical properties of oil palm fibre-reinforced polymer composites: A review. *J Mater Res Technol* 2022;17:33–65. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.122>.
- [2] Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2016;83:98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.
- [3] Mohanty AK, Misra M, Hinrichsen G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromol Mater Eng* 2000;276:1–24. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W).
- [4] Kamarudin SH, Mohd Basri MS, Rayung M, Abu F, Ahmad S, Norizan MN, et al. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers (Basel)* 2022;14:3698. <https://doi.org/10.3390/polym14173698>.
- [5] Shinoj S, Visvanathan R, Panigrahi S, Kochubabu M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Ind Crops Prod* 2011;33:7–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.009>.
- [6] Nugraha AD, Nuryanta MI, Sean L, Budiman K, Kusni M, Muflikhun MA. Recent Progress on Natural Fibers Mixed with CFRP and GFRP: Properties, Characteristics, and Failure Behaviour. *Polymers (Basel)* 2022;14:5138. <https://doi.org/10.3390/polym14235138>.
- [7] Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci* 2012;37:1552–96. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>.
- [8] Dittenber DB, GangaRao HVS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2012;43:1419–29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>.
- [9] Ku H, Wang H, Pattarachaiyakoo N, Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Compos Part B Eng* 2011;42:856–73. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010>.
- [10] Jawaid M, Abdul Khalil HPS. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydr Polym* 2011;86:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>.
- [11] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Prog Polym Sci* 1999;24:221–74. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).
- [12] Sreekala MS, Kumaran MG, Thomas S. Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. *J Appl Polym Sci* 1997;66:821–35. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19971031\)66:5<821::AID-APP2>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19971031)66:5<821::AID-APP2>3.0.CO;2-X).
- [13] Then YY, Ibrahim NA, Zainuddin N, Ariffin H, Wan Yunus WMZ. Oil Palm Mesocarp Fiber as New Lignocellulosic Material for Fabrication of Polymer/Fiber Biocomposites. *Int J Polym Sci* 2013;2013:797452. <https://doi.org/10.1155/2013/797452>.
- [14] Salakhov II, Shaidullin NM, Chalykh AE, Matsko MA, Shapagin A V, Batyrshin AZ, et al. Low-Temperature Mechanical Properties of High-Density and Low-Density Polyethylene and Their Blends. *Polymers (Basel)* 2021;13:1821. <https://doi.org/10.3390/polym13111821>.
- [15] Pham NTH. Characterization of Low-Density Polyethylene and LDPE-Based/Ethylene-Vinyl Acetate with Medium Content of Vinyl Acetate. *Polymers (Basel)* 2021;13:2352. <https://doi.org/10.3390/polym13142352>.
- [16] Sreekala MS, Kumaran MG, Joseph S, Jacob M, Thomas S. Oil Palm Fibre Reinforced Phenol Formaldehyde Composites: Influence of Fibre Surface Modifications on the Mechanical Performance. *Appl Compos Mater* 2000;7:295–329. <https://doi.org/10.1023/A:1026534006291>.
- [17] Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Compos Part B Eng* 2012;43:2883–92. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>.
- [18] Xie Y, Hill CAS, Xiao Z, Militz H, Mai C. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2010;41:806–19. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>.
- [19] Li X, Tabil LG, Panigrahi S. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *J Polym Environ* 2007;15:25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>.
- [20] Abdelmouleh M, Boufi S, Belgacem MN, Dufresne A. Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading. *Compos Sci Technol* 2007;67:1627–39. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.003>.
- [21] Nuryanta MI, Widodo RD, Mujaki A, Rusiyanto, Kriswanto, Widayat W, et al. The effect of stacking sequence on the properties of hybrid agel/glass fiber reinforced polymer composite laminates. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2024;1381:12014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1381/1/012014>.

- [22] Olusunmade OF, Adetan DA, Ogunnigbo CO. A Study on the Mechanical Properties of Oil Palm Mesocarp Fibre-Reinforced Thermoplastic. *J Compos* 2016;2016:3137243. <https://doi.org/10.1155/2016/3137243>.
- [23] Guedes JR, Florentino WM, Rodrigues LM, dos Santos C, Mulinari DR. Mechanical Properties of Natural Fibers Reinforced Polymer Composites: Palm/Low Density Polyethylene. *Mater Sci Forum* 2016;869:326–30. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.869.326>.
- [24] Miah MJ, Khan MA, Khan RA. Fabrication and Characterization of Jute Fiber Reinforced Low Density Polyethylene Based Composites: Effects of Chemical Treatment. *J Sci Res* 2011;3:249–59. <https://doi.org/10.3329/jsr.v3i2.6763>.
- [25] Arrakhiz FZ, El Achaby M, Malha M, Bensalah MO, Fassi-Fehri O, Bouhfid R, et al. Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene. *Mater Des* 2013;43:200–5. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.056>.
- [26] Sdrobis A, Darie RN, Totolin M, Cazacu G, Vasile C. Low density polyethylene composites containing cellulose pulp fibers. *Compos Part B Eng* 2012;43:1873–80. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.064>.
- [27] Ferreira F V, Trindade GN, Lona LMF, Bernardes JS, Gouveia RF. LDPE-based composites reinforced with surface modified cellulose fibres: 3D morphological and morphometrical analyses to understand the improved mechanical performance. *Eur Polym J* 2019;117:105–13. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.05.005>.
- [28] Mubarak YA, Abdulsamad RT. Effects of microcrystalline cellulose on the mechanical properties of low-density polyethylene composites. *J Thermoplast Compos Mater* 2019. <https://doi.org/10.1177/0892705717753056>.
- [29] Migneault S, Koubaa A, Erchiqui F, Chaala A, Englund K, Wolcott MP. Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2009;40:80–5. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.10.004>.
- [30] Bouafif H, Koubaa A, Perré P, Cloutier A. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2009;40:1975–81. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.06.003>.
- [31] Sormunen P, Kärki T. Compression Molded Thermoplastic Composites Entirely Made of Recycled Materials. *Sustainability* 2019;11:631. <https://doi.org/10.3390/su11030631>.
- [32] Valente M, Rossitti I, Sambucci M. Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter. *Polymers (Basel)* 2023;15:242. <https://doi.org/10.3390/polym15010242>.
- [33] Song Y, al. et. A Novel CAE Method for Compression Molding Simulation of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite Sheet Materials. *J Compos Sci* 2018;2:33. <https://doi.org/10.3390/jcs2020033>.
- [34] Holbery J, Houston D. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. *JOM* 2006;58:80–6. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0234-2>.
- [35] Ferreira F V, Pinheiro IF, de Souza SF, Mei LHI, Lona LMF. Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers and Nanocellulose in the Automotive Industry: A Short Review. *J Compos Sci* 2019;3:51. <https://doi.org/10.3390/jcs3020051>.
- [36] International A. ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 2022. <https://doi.org/10.1520/D0638-22>.
- [37] International A. ASTM D790-25: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 2025. <https://doi.org/10.1520/D0790-25>.
- [38] Widodo RD, Susetyo FAN, Rusiyanto, Kriswanto, Darsono FB. Kekuatan Tarik Dan Bending Komposit Berpenguat Serat Arengga Pinnata Bermatriks Epoksi Berbasis Fraksi Volume Dan Orientasi Serat. *Media Mesin Maj Tek Mesin* 2022;23:1–12. <https://doi.org/10.23917/mesin.v23i1.15791>.
- [39] Seculi F, Julián F, Llorens J, Espinach FX, Mutjé P, Tarrés Q. Methodologies to Evaluate the Micromechanics Flexural Strength Properties of Natural-Fiber-Reinforced Composites: The Case of Abaca-Fiber-Reinforced Bio Polyethylene Composites. *Polymers (Basel)* 2023;15:3137. <https://doi.org/10.3390/polym15143137>.
- [40] Khan MZR, Srivastava SK, Gupta MK. Tensile and flexural properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review. *J Reinf Plast Compos* 2018. <https://doi.org/10.1177/0731684418799528>.
- [41] Ahmad MN, Ishak MR, Taha MM, Mustapha F, Leman Z. Rheological and Morphological Properties of Oil Palm Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites for Fused Deposition Modeling (FDM). *Polymers (Basel)* 2021;13:3739. <https://doi.org/10.3390/polym13213739>.
- [42] International A. ASTM D570-22: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics 2022. <https://doi.org/10.1520/D0570-22>.