



Pengaruh Konsentrasi Silane Coupling Agent terhadap Sifat Mekanik Komposit Epoksi Berpenguat Serbuk Batang Sagu

Suwantri ^{1,*}, Siswanto ¹, Andi Prasetyo ², Kusuma Dewi ³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Pratama Mulia, Surakarta

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Nahdlatul Ulama Surakarta

³ Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta

Kata kunci

serbuk batang sagu
silane coupling agent
kekuatan lentur
kekuatan dampak
SEM

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi *silane coupling agent* (SCA) terhadap sifat mekanik, terutama kekuatan lentur dan dampak, komposit epoksi berpenguat serbuk batang sagu. Penelitian menggunakan matriks epoksi dengan fraksi volume (vf) 60%, penguat serbuk batang sagu berukuran 20–40 mesh dengan fraksi volume 40%, *hardener* EPH 555, dan SCA jenis vinil dengan konsentrasi 0%, 3%, dan 5%. Matriks resin, serbuk batang sagu, SCA, dan *hardener* EPH 555 dicampur lalu dituangkan ke dalam cetakan. Pengujian kekuatan lentur mengikuti standar ASTM D790 dengan spesimen berukuran panjang 127 mm, lebar $12,7 \pm 0,2$ mm, dan tebal $3,2 \pm 0,2$ mm. Pengujian kekuatan dampak menggunakan standar ASTM D5941 dengan spesimen berukuran panjang 80 ± 2 mm, lebar $10,0 \pm 0,2$ mm, dan tebal $4,0 \pm 0,2$ mm. *Scanning electron microscopy* (SEM) dilakukan untuk menganalisis permukaan patahan dan menentukan ikatan antara permukaan serat dan matriks. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 5% SCA meningkatkan kekuatan dampak komposit serbuk epoksi–sagu sebesar 29,26% dan kekuatan lentur sebesar 68,5%. Komposit tanpa SCA memiliki densitas $1,4 \text{ g/cm}^3$, sedangkan komposit dengan 3% dan 5% SCA masing-masing mencapai densitas $1,55 \text{ g/cm}^3$ dan $1,65 \text{ g/cm}^3$. Kepadatan meningkat sebesar 10,71% pada konsentrasi SCA 3% dan 17,86% pada konsentrasi 5% dibandingkan dengan komposit tanpa SCA. Penambahan SCA meningkatkan daya rekat, kekuatan lentur, kekuatan dampak, dan densitas komposit.

* **Corresponding author:**

Suwantri (email: suwantri1981@gmail.com)

Diterima: 23 Juni 2026

Disetujui: 11 Juli 2026

Dipublikasikan: 14 September 2026

1 Pendahuluan

Penggunaan serat atau serbuk alam memiliki potensi besar sebagai penguat material komposit karena karakteristik mekaniknya yang menguntungkan dan bobotnya yang rendah sehingga mendukung pengembangan produk yang lebih efisien serta hemat biaya [1]. Keunggulan ini membuat aplikasinya meluas di berbagai sektor industri, mulai dari otomotif, penerbangan, kelautan, hingga peralatan olahraga [2]. Kombinasi sifat mekanik yang baik dan densitas rendah menyebabkan permintaan terhadap material komposit berpenguat bahan alam terus meningkat [3]. Kendati demikian, pemanfaatan serbuk alam sering menghadapi kendala berupa lemahnya adhesi antarmuka (*interfacial bonding*) dengan matriks polimer serta tingginya penyerapan kelembapan. Sifat serat alam yang hidrofilik (menyukai air) bertolak belakang dengan sifat matriks epoksi yang hidrofobik (menolak air), sehingga dapat memicu pembentukan rongga (*void*) yang menurunkan integritas struktural dan performa mekanik komposit.

Komposit serat alam berasal dari bagian tanaman, seperti batang, daun, biji, buah, dan akar. Keunggulan serat alam antara lain ketersediaannya yang melimpah, ramah lingkungan, hemat biaya, dan berdensitas rendah [4]. Selain itu, komposit serat alam telah diaplikasikan di berbagai bidang, seperti industri otomotif, dirgantara, biomedis, dan kelautan [5]. Pada tahun 2016, Arun et al. menemukan bahwa serat pohon pisang dan serat kelapa

memiliki kekuatan tarik masing-masing sebesar 8,9 MPa dan 14,7 MPa [6]. Meskipun angka tersebut membuktikan kapasitas penguatan material berbasis hayati, data tersebut sekaligus menegaskan bahwa performa mekanik komposit sangat bergantung pada jenis serat, jenis matriks, dan kualitas interaksi di antara keduanya. Serbuk batang sagu memiliki geometri partikel yang berbeda dari serat alam lainnya sehingga perilaku mekaniknya di dalam matriks epoksi tidak dapat disamakan dan perlu diuji secara menyeluruh. Bhoophthi (2017) melaporkan bahwa serat rami memiliki kekuatan tarik sebesar 40,7 MPa [7]. Selanjutnya, serat bambu menunjukkan kekuatan tarik berkisar antara 1,43 hingga 1,69 GPa [8]. Pengujian impak juga dilakukan oleh beberapa peneliti. Sebagai contoh, Gupta dkk. menggunakan serat sisal yang menunjukkan kekuatan impak sebesar 4,5 J/m [9]. Studi komposit yang melibatkan serat rami dan HDPE daur ulang menunjukkan kekuatan impak sebesar 51,1 kJ/m² [10], sedangkan komposit berpenguat serat bambu memiliki kekuatan impak sebesar 30 kJ/m² [11]. Biokomposit serat sagu yang digunakan dalam produksi karton menunjukkan kekuatan impak sebesar 14 J/m [12].

Namun, penelitian khusus tentang komposit epoksi yang diperkuat serbuk batang sagu dan diberi perlakuan dengan berbagai konsentrasi *silane coupling agent* (SCA) masih terbatas. Sebagian besar penelitian berfokus pada serat seperti kenaf [13], rami [14], atau bambu [8], sementara kinerja mekanik komposit berbasis limbah sagu, terutama kekuatan lentur dan impaknya, belum banyak dieksplorasi. Selain itu, peran SCA dalam meningkatkan ikatan antarmuka dan transfer beban pada sistem sagu–epoksi dengan variasi konsentrasi SCA tertentu belum banyak dijelaskan.

Sebagian besar serat alami merupakan limbah dari sektor pertanian. Pemanfaatan limbah tersebut tidak hanya menawarkan alternatif untuk mengurangi penggunaan bahan berbasis plastik, tetapi juga membantu mengurangi akumulasi limbah pertanian sekaligus meningkatkan pendapatan petani. Namun, fasilitas produksi yang mengolah bahan alami sering menghadapi tantangan dalam mengelola limbah yang dihasilkan. Hal ini terlihat di Desa Tulung, Kabupaten Klaten, yang sebagian penduduknya memproduksi tepung hong kwe dari tanaman sagu. Limbah sagu yang dihasilkan belum dimanfaatkan secara efektif dan sering kali dibuang atau dibakar sehingga berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan. Serat sagu berpotensi dimanfaatkan sebagai penguat material komposit dan menjadi solusi pemanfaatan limbah sagu. Limbah ini dapat diproses menggunakan berbagai teknik, seperti pencetakan kompresi, pencetakan injeksi, dan *thermoforming*. Pendekatan serupa telah diterapkan untuk mengubah ampas tebu menjadi karton komposit [12]. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh konsentrasi SCA 0%, 3%, dan 5% terhadap kekuatan impak, kekuatan lentur, densitas, dan karakteristik ikatan antarmuka berdasarkan hasil pengamatan SEM.

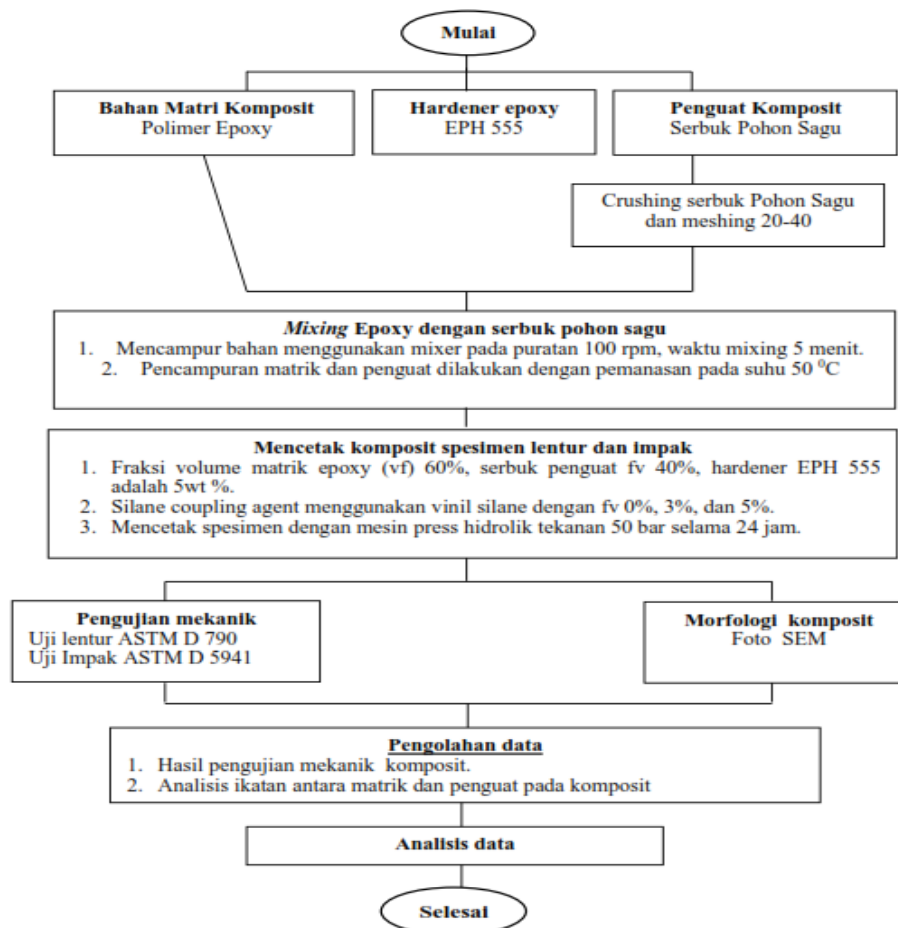
Penggunaan serat alami perlu melalui proses perlakuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap air, keterbasahan permukaan, dan daya rekat antarmuka. Performa serat sangat penting untuk memperoleh sifat fisik dan mekanik komposit. Perlakuan tersebut hanya memodifikasi permukaan dinding sel terluar tanpa mengubah karakteristik internal serat. Beberapa metode dilakukan melalui modifikasi kimia untuk mengubah sifat dinding sel serat [15] atau penggunaan agen penghubung [16]. SCA merupakan bahan kimia yang berfungsi pada antarmuka untuk menciptakan jembatan kimia antara penguat dan matriks. SCA meningkatkan daya rekat antarmuka ketika salah satu ujung molekulnya terikat pada permukaan penguat, sedangkan gugus fungsional pada ujung lainnya bereaksi dengan fase polimer [17].

2 Metode Penelitian

Pembuatan spesimen dilakukan di Laboratorium Pemesinan Politeknik Pratama Mulia Surakarta, sedangkan pengujian sifat mekanik komposit dilakukan di Laboratorium Material dan Pusat Unggulan Plastik Politeknik ATMI Surakarta. Alat yang digunakan meliputi: (1) mesin penghancur; (2) mesin press hidrolik; (3) mesin uji tarik (*Ultimate Tensile Machine*/UTM); (4) mesin uji impak metode Izod; dan (5) mikroskop elektron pemindai (*Scanning Electron Microscope*/SEM). Bahan penelitian terdiri atas polimer epoksi sebagai matriks, *hardener* EPH 555, dan serbuk batang sagu sebagai penguat komposit. Ukuran partikel serbuk dikendalikan secara seragam pada rentang 20–40 mesh.

Bahan penguat komposit berupa serbuk batang sagu dihasilkan dengan cara menghancurkan serat batang sagu menggunakan mesin penghancur. Setelah dihancurkan, bahan diayak menggunakan ayakan 20 dan 40 mesh. Serbuk batang sagu kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 200 °C selama 20 menit untuk menghilangkan kadar air dan meningkatkan daya rekat antara matriks dan serbuk penguat saat pencetakan komposit. Pemilihan suhu tinggi dengan durasi singkat tersebut didasarkan pada prosedur laboratorium untuk menguapkan kandungan air permukaan secara cepat tanpa memberikan waktu bagi panas untuk mendegradasi komponen lignoselulosa internal serbuk sagu. Fraksi volume (vf) penguat serbuk batang sagu ditetapkan sebesar 40%, sedangkan matriks komposit menggunakan resin epoksi dengan fraksi volume 60%. EPH 555 digunakan sebagai *hardener*. Untuk modifikasi permukaan, *silane coupling agent* (SCA) jenis vinil ditambahkan dengan variasi konsentrasi 0%, 3%, dan 5%. Persentase fraksi volume SCA dihitung secara spesifik terhadap volume total serbuk batang sagu dan ditambahkan secara eksternal, di luar komposisi utama (rasio dasar 60:40). Dengan demikian, penambahan SCA tidak mengubah proporsi absolut fraksi volume antara matriks epoksi dan serbuk sagu dalam sistem komposit.

Pencetakan spesimen dilakukan dengan prosedur sebagai berikut. Resin epoksi (vf 60%), serbuk batang sagu (vf 40%), *hardener* EPH 555, dan vinil SCA dicampur menggunakan mixer selama 5 menit dengan kecepatan 100 rpm. Prosedur pencampuran dilakukan secara langsung (*direct mixing*), yaitu serbuk batang sagu, resin epoksi, *hardener*, dan variasi konsentrasi vinil SCA dimasukkan secara bersamaan ke dalam wadah untuk diaduk menggunakan *mechanical mixer*. Metode pencampuran langsung tanpa perlakuan awal (*pre-treatment*) terpisah pada serbuk ditetapkan sebagai batasan dalam interpretasi hasil penelitian. Kondisi ini dapat memengaruhi efektivitas optimalisasi ikatan antarmuka karena sebagian molekul silane berpotensi bereaksi langsung dengan matriks sebelum sepenuhnya melapisi permukaan serbuk sagu. Perbandingan fraksi volume antara matriks epoksi dan *hardener* EPH 555 adalah 1:1, sedangkan variasi fraksi volume SCA adalah 0%, 3%, dan 5%. Bahan campuran kemudian dituangkan ke dalam cetakan baja dan ditekan dengan tekanan 50 bar selama 24 jam pada suhu kamar untuk proses pengeringan. Spesimen yang telah mengeras dikeluarkan dari cetakan dan dipotong menjadi spesimen uji lentur standar ASTM D 790 berukuran 127 × 12,7 × 3,2 mm serta spesimen uji impak Izod standar ASTM D 5941 berukuran 80 × 10 × 4 mm. Bagan alir penelitian disajikan pada Gambar 1.

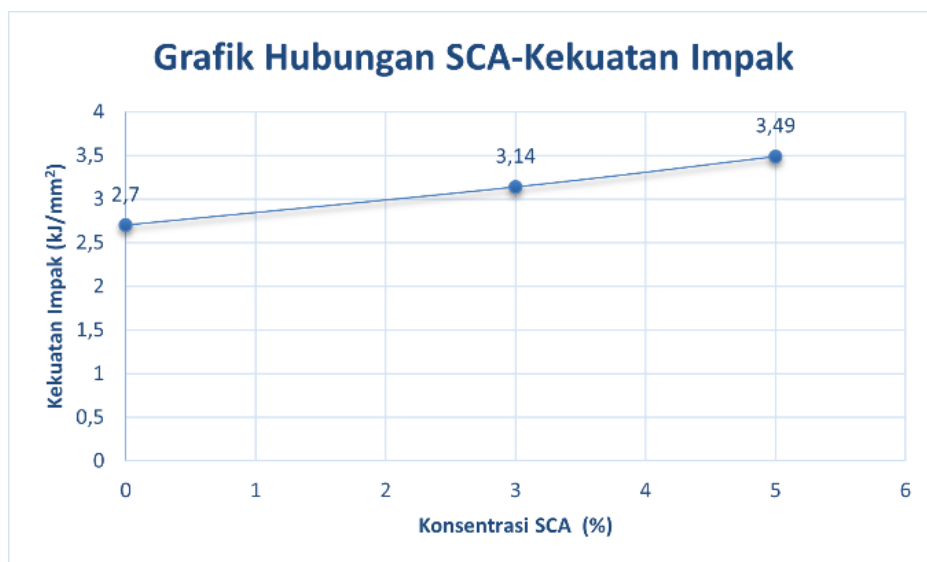


Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

3 Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Uji Impak

Hasil uji impact yang disajikan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa penambahan *silane coupling agent* (SCA) meningkatkan kekuatan impact komposit serbuk epoksi–sagu. Komposit yang mengandung 5% SCA mencapai kekuatan impact tertinggi, yaitu 3,49 kJ/mm², dibandingkan dengan 2,70 kJ/mm² pada komposit tanpa SCA. Peningkatan sebesar 29,26% ini mengindikasikan bahwa SCA berpotensi meningkatkan interaksi antara serat dan matriks, yang penting untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap beban dinamis.



Gambar 2. Hasil Uji Impak Komposit Epoksi–Serbuk Sagu

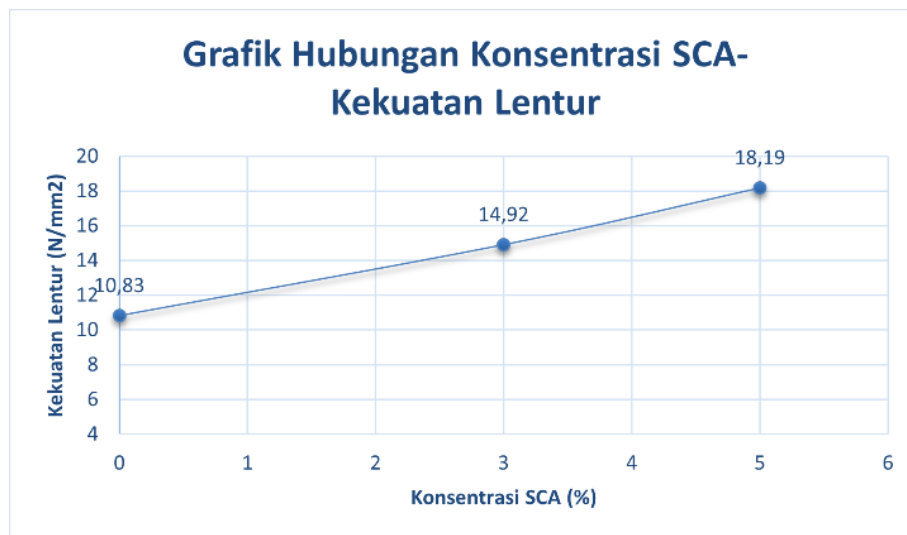
SCA berfungsi memodifikasi permukaan serat sago untuk meningkatkan kompatibilitasnya dengan matriks epoksi [18]. Molekul SCA terdiri atas dua ujung dengan sifat berbeda: satu ujung bereaksi dengan permukaan serat, sedangkan ujung lainnya terikat pada matriks [19]. Proses ini membentuk jembatan kimia yang memperkuat ikatan antara serat dan matriks. Jembatan kimia merupakan ikatan yang tercipta antara dua molekul berbeda, yang dapat berupa ikatan kovalen atau interaksi antarmolekul [20]. Dalam konteks ini, jembatan kimia memfasilitasi hubungan antara serat alami dan matriks resin epoksi sehingga menghasilkan antarmuka yang lebih stabil dan memungkinkan distribusi beban yang lebih merata selama tumbukan [1].

Selain itu, penerapan SCA mengurangi sifat hidrofilik serat sago sehingga mengurangi kemampuannya menyerap air [2]. Penyerapan air mengacu pada kapasitas serat alami untuk mengambil dan mempertahankan kelembapan dari lingkungan. Ketika serat sago menyerap air, struktur molekul di sekitar ikatan serat–matriks terganggu sehingga melemahkan adhesi antarmuka dan mengurangi kekuatan mekanik komposit secara keseluruhan [21], [22]. Perubahan dimensi serat akibat penyerapan air juga menyebabkan ketidakstabilan dan potensi kerusakan [3].

Tanpa SCA, komposit epoksi–serbuk sago cenderung memiliki kekuatan yang lebih rendah, yang ditunjukkan oleh nilai 2,70 kJ/mm². Hal ini disebabkan oleh ikatan antara serat dan matriks yang tidak sekuat ikatan pada komposit yang mengandung SCA. Dengan membentuk jembatan kimia, SCA menciptakan hubungan yang lebih stabil, meningkatkan ikatan antara serat dan matriks, serta mengurangi titik lemah dalam komposit. Ikatan yang lebih kuat dan stabil memungkinkan komposit menahan tekanan dan beban tiba-tiba dengan lebih baik sehingga meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan akibat benturan. Fenomena ini konsisten dengan temuan Chotirat, Chaochanchaikul, dan Sombatsompop yang melaporkan bahwa peningkatan ikatan antarmuka antara serat dan matriks meningkatkan kekuatan impact komposit serat–polimer [4].

3.2. Hasil Uji Lentur

Gambar 3 menunjukkan bahwa penambahan 5% SCA menghasilkan kekuatan lentur tertinggi, yaitu 18,19 N/mm², dibandingkan dengan komposit epoksi–serbuk sago tanpa SCA yang hanya mencapai 10,83 N/mm². Komposit epoksi–serbuk sago dengan 3% SCA menunjukkan kekuatan lentur sebesar 14,92 N/mm². Peningkatan kekuatan lentur ini cukup signifikan; 5% SCA meningkatkan kekuatan lentur sebesar 68,5% dibandingkan dengan komposit tanpa SCA, sedangkan 3% SCA memberikan peningkatan sebesar 37,4%.



Gambar 3. Uji Lentur Komposit Epoksi–Serbuk Sagu

Peningkatan kekuatan lentur komposit epoksi–serbuk sagu mengonfirmasi bahwa aplikasi vinil SCA berhasil meningkatkan kualitas ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara penguat dan matriks polimer. Secara mekanistik, molekul silane bertindak sebagai jembatan kimia bifungsional; gugus silanol (Si–OH) hasil hidrolisis SCA membentuk ikatan kovalen siloksan (Si–O–Si) dengan gugus hidroksil (OH) pada permukaan selulosa serbuk sagu, sedangkan gugus fungsional vinil berinteraksi membentuk jaringan silang (*cross-linking*) dengan rantai epoksi selama proses **curing**. Pada komposit tanpa perlakuan (SCA 0%), pengamatan SEM menunjukkan permukaan patahan yang kasar dengan dominasi fenomena **fiber pull-out** (serbuk terlepas) dan keberadaan celah (*gap*) atau rongga mikro (*void*) yang jelas di sekitar partikel serbuk sagu. Karakteristik mikro ini mengindikasikan adhesi antarmuka yang buruk akibat perbedaan sifat hidrofilik serat alam dan sifat hidrofobik matriks epoksi. Ketidakmampuan antarmuka dalam mentransfer tegangan menyebabkan retak menjalar dengan mudah melewati batas butir tanpa hambatan berarti, yang melandasi rendahnya kekuatan lentur sampel kontrol.

Sebaliknya, pada mikrografi SEM spesimen dengan variasi konsentrasi SCA 3% dan 5% terlihat perubahan morfologi yang signifikan; permukaan patahan tampak lebih homogen dan rata (**flat cleavage fracture**). Partikel serbuk batang sagu tampak tertanam kuat (**embedded**) dan terselimuti dengan baik oleh matriks epoksi tanpa celah pemisah yang berarti pada area antarmuka. Matriks silane berhasil membasahi (**wetting**) permukaan penguat secara optimal. Penguatan pada tingkat molekuler ini mengubah karakteristik antarmuka dari batas mekanis yang lemah menjadi ikatan kimia yang kokoh. Temuan SEM ini sejalan dengan penelitian terdahulu oleh Arun et al. dan literatur terkait modifikasi silane lainnya, yang menyatakan bahwa eliminasi cacat mikro seperti *void* dan **pull-out** merupakan indikator utama efisiensi transfer tegangan dari matriks menuju serat di bawah tekanan eksternal [5]. Ketika komposit menerima beban lentur, beban didistribusikan secara seragam ke seluruh jaringan material sehingga mengurangi titik konsentrasi tegangan (**stress concentration**) yang memicu kegagalan struktural dini.

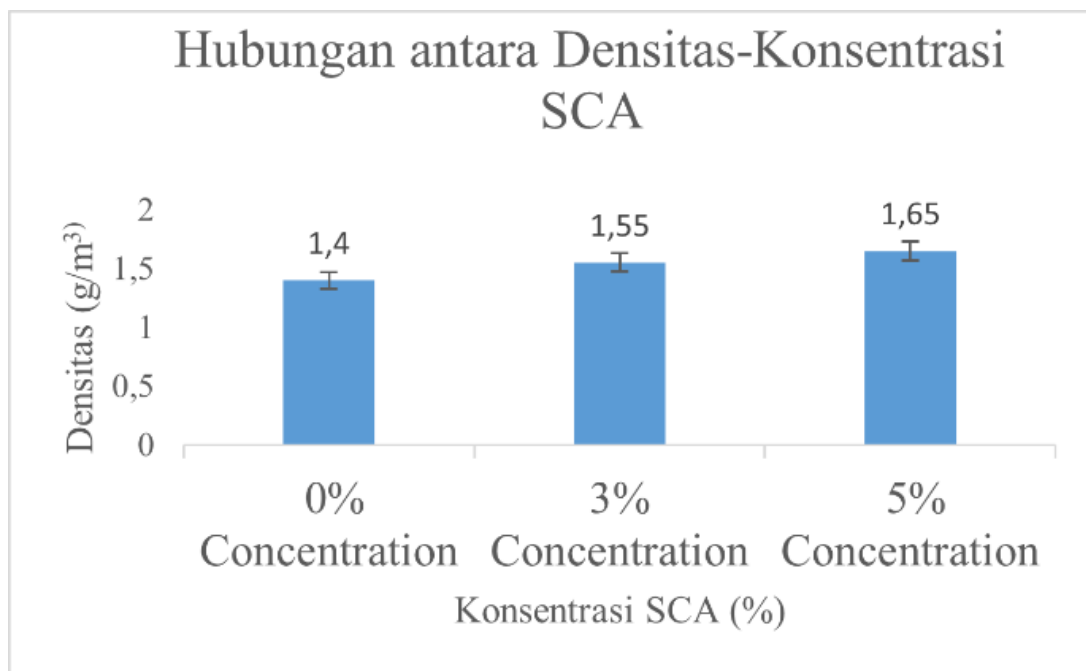
Di samping mengoptimalkan transfer beban mekanis, pembentukan lapisan silane pada permukaan serbuk sagu secara efektif menutupi gugus hidroksil bebas. Penurunan sifat hidrofilik biomassa sagu ini secara signifikan menurunkan kapasitas penyerapan kelembapan dari lingkungan luar [6]. Dengan tertekannya difusi air ke dalam komposit, pembentukan rongga baru akibat pembengkakan serat (**fiber swelling**) dan degradasi hidrolitik pada matriks dapat dicegah. Hasil pengamatan SEM yang menunjukkan struktur mikro padat tanpa retakan internal membuktikan bahwa pemeliharaan integritas struktural pada skala mikro merupakan faktor kunci dalam menjaga stabilitas dan mempertahankan kekuatan lentur optimal komposit epoksi–serbuk batang sagu [6].

Proses ini menjelaskan mengapa komposit epoksi–serbuk sagu dengan SCA menunjukkan kekuatan lentur yang lebih tinggi. Ketika SCA berinteraksi dengan serat dan matriks, SCA membentuk ikatan antarmuka yang lebih kuat dan stabil. Hal ini tidak hanya meningkatkan kekuatan lentur, tetapi juga meminimalkan potensi kerusakan yang disebabkan oleh fluktuasi kelembapan lingkungan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan daya rekat akibat penambahan SCA berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kinerja mekanik

secara keseluruhan [8], [9]. Lebih lanjut, peningkatan kekuatan lentur konsisten dengan hasil uji impak (Gambar 2), yang menunjukkan bahwa komposit dengan penambahan SCA memiliki ketahanan lebih baik terhadap beban dinamis. Kekuatan impak yang lebih tinggi mencerminkan kemampuan komposit menyerap energi saat tumbukan, yang merupakan indikator penting ketahanan material terhadap kondisi ekstrem.

3.3. Hasil Uji Densitas

Peningkatan densitas komposit epoksi–serbuk sago akibat penambahan *silane coupling agent* (SCA) berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kekuatan lentur dan impak. Data menunjukkan bahwa komposit tanpa SCA memiliki densitas sebesar 1,40 g/cm³, sedangkan komposit dengan konsentrasi SCA 3% dan 5% masing-masing mencapai densitas 1,55 g/cm³ dan 1,65 g/cm³. Hal ini menunjukkan peningkatan densitas sebesar 10,71% pada konsentrasi 3% dan 17,86% pada konsentrasi 5% dibandingkan dengan komposit tanpa SCA. Hasil uji densitas komposit epoksi–serbuk sago disajikan pada Gambar 4.



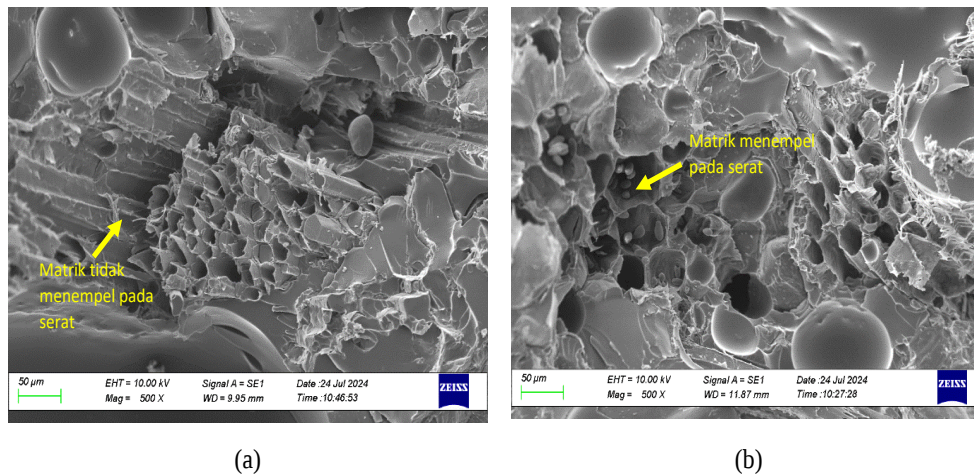
Gambar 4. Hasil Uji Densitas Komposit Epoksi–Serbuk Sagu

Peningkatan densitas dapat menjadi salah satu indikasi meningkatnya kepadatan struktur komposit yang berkaitan dengan peningkatan sifat mekanik. Kepadatan yang lebih tinggi menunjukkan bahwa lebih banyak material terikat erat karena peran SCA sebagai jembatan kimia yang memperkuat daya rekat antara kedua komponen. Ikatan antarmuka yang meningkat ini tidak hanya meningkatkan densitas, tetapi juga memengaruhi distribusi beban di dalam komposit ketika mengalami tekanan [11]. Pada pengujian lentur, peningkatan densitas berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan lentur sebesar 68,5% dibandingkan dengan komposit tanpa SCA.

Kenaikan nilai densitas pada komposit dengan perlakuan silane merupakan indikasi pendukung terjadinya pemadatan struktur makro material, yang terutama dipicu oleh penurunan volume porositas dan minimnya udara yang terjebak (**trapped air**) selama proses manufaktur. Peran vinil SCA dalam meningkatkan keterbasahan (**wetting**) matriks epoksi terhadap serbuk batang sago memungkinkan pengisian celah mikro secara lebih optimal. Fenomena peningkatan densitas tidak dapat dijadikan bukti tunggal atas menguatnya ikatan antarmuka, tetapi perlu dikorelasikan dan divalidasi melalui pengamatan SEM. Hasil mikrografi SEM membuktikan bahwa pada variasi konsentrasi SCA 3% dan 5%, rongga mikro (*void*) dan celah pemisah pada area antarmuka mengalami pengurangan signifikan dibandingkan dengan komposit kontrol (SCA 0%). Penurunan porositas yang terindikasi dari kenaikan densitas dan diperkuat oleh hilangnya cacat mikro pada visualisasi SEM menciptakan struktur komposit yang lebih solid dan kontinu. Struktur padat tersebut memfasilitasi distribusi beban secara efisien ke seluruh jaringan material ketika menerima tekanan eksternal [16]. Konsekuensinya, sinergi antara penurunan porositas dan penguatan mekanis antarmuka berkontribusi nyata terhadap peningkatan kekuatan lentur hingga mencapai 68,5% dibandingkan dengan komposit tanpa SCA.

3.4. Hasil Uji SEM

Gambar 5 menyajikan perbedaan hasil SEM antara komposit tanpa *silane coupling agent* (SCA) dan komposit dengan 5% SCA pada area yang diamati. Permukaan serat pada komposit tanpa SCA tampak lebih bersih atau kurang tertutup resin. Komposit dengan 5% SCA menunjukkan kekuatan dampak tertinggi sebesar 3,49 kJ/mm². Hal ini menunjukkan bahwa komposit yang lebih padat dan terikat dengan baik menyerap lebih banyak energi ketika mengalami beban dinamis sehingga lebih tahan terhadap kerusakan akibat benturan [12]. Dengan demikian, peningkatan densitas melalui penambahan SCA berperan penting dalam meningkatkan kinerja mekanik komposit secara keseluruhan.



Gambar 5. Hasil SEM Komposit tanpa Silane Coupling Agent (SCA) dan Komposit dengan 5% SCA

Sebaliknya, Gambar 5b menunjukkan sisa resin yang menempel pada serat dengan penambahan 5% SCA. Hal ini menunjukkan bahwa SCA berfungsi sebagai jembatan kimiawi yang meningkatkan daya rekat antara serat alami dan matriks resin epoksi [16]. SCA meningkatkan interaksi antarmuka dengan menciptakan ikatan yang lebih kuat antara serat dan resin. Proses ini memungkinkan resin merangkul serat secara lebih efektif sehingga menghasilkan daya rekat yang lebih baik [17]. Kehadiran resin residu tidak hanya mencerminkan kekuatan ikatan yang lebih tinggi, tetapi juga berkontribusi terhadap distribusi beban yang lebih baik ketika komposit mengalami tekanan. Dengan adanya ikatan yang kuat, energi dapat diserap secara lebih efisien sehingga mengurangi kemungkinan titik lemah yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada komposit [23]. Hasil SEM ini mendukung temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa penambahan SCA secara signifikan meningkatkan kekuatan mekanik pada uji lentur dan uji dampak. Penggunaan agen penghubung silan juga dapat meningkatkan sifat mekanik komposit [24]. Oleh karena itu, pengamatan SEM memperkuat bahwa SCA tidak hanya meningkatkan daya rekat, tetapi juga mengoptimalkan kinerja komposit secara keseluruhan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Investigasi terbatas pada rentang konsentrasi SCA dan hanya menggunakan satu jenis agen penghubung silan. Kondisi tersebut dapat memengaruhi generalisasi hasil dan pemahaman mengenai efektivitas SCA pada sistem komposit yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut dapat dikembangkan dengan berbagai jenis dan variasi konsentrasi SCA serta ukuran partikel serbuk batang sugu untuk memvalidasi dan memperluas temuan saat ini.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penambahan SCA meningkatkan kekuatan dampak komposit serbuk epoksi–sagu sebesar 29,26% pada konsentrasi 5% SCA dengan komposisi epoksi 60%, serbuk batang sugu 40%, ukuran partikel 20–40 mesh, dan rentang SCA 0–5%. Penambahan 5% SCA juga meningkatkan kekuatan lentur sebesar 68,5%. Peningkatan densitas komposit epoksi–serbuk sugu akibat penambahan SCA berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kekuatan lentur dan dampak. Komposit tanpa SCA memiliki densitas sebesar 1,40 g/cm³, sedangkan komposit dengan 3% dan 5% SCA masing-masing

mencapai densitas 1,55 g/cm³ dan 1,65 g/cm³. Hal ini sesuai dengan peningkatan densitas sebesar 10,71% dan 17,86% pada konsentrasi 3% dan 5% dibandingkan dengan komposit tanpa SCA. Hasil *SEM* mengindikasikan perbaikan adhesi antarmuka yang berkaitan dengan peningkatan kekuatan lentur dan dampak. Kekuatan lentur, kekuatan dampak, dan densitas komposit epoksi berpenguat serbuk batang sagu mencapai nilai tertinggi pada konsentrasi SCA 5% dalam rentang variasi yang diuji. Hasil ini mengonfirmasi efektivitas SCA dalam meningkatkan kinerja komposit. Temuan ini masih terbatas pada satu jenis SCA, tiga variasi konsentrasi, dan pengamatan *SEM* kualitatif pada sampel terpilih.

5 Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi, yang telah memberikan dukungan dana melalui hibah PDP. Terima kasih juga disampaikan kepada Politeknik Pratama Mulia Surakarta yang telah menyediakan fasilitas pembuatan spesimen uji serta kepada Laboratorium Pengujian Material Politeknik ATMI Surakarta yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan pengujian kekuatan dampak, lentur, dan *SEM*. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat aktif dalam penelitian ini.

6 Referensi

- [1] A. Konakanchi, R. K. Alla, and V. Guduri, "Silane coupling agents – Benevolent binders in composites," *Trends Biomater. Artif. Organs*, vol. 31, no. 3, pp. 108–113, 2017.
- [2] K. Chen, P. Li, X. Li, C. Liao, X. Li, and Y. Zuo, "Effect of silane coupling agent on compatibility interface and properties of wheat straw/polylactic acid composites," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 182, pp. 2108–2116, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.207>.
- [3] A. S. Singha and V. K. Thakur, "Synthesis and Characterizations of Silane Treated Grewia optiva Fibers," *Int. J. Polym. Anal. Charact.*, vol. 14, no. 4, pp. 301–321, May 2009, doi: 10.1080/10236660902871470.
- [4] L. Chotirat, K. Chaochanchaikul, and N. Sombatsompop, "On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile–butadiene–styrene/wood sawdust composites," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 27, no. 8, pp. 669–678, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.02.001>.
- [5] S. A. Rafiqah et al., "A review on properties and application of bio-based poly(Butylene succinate)," *Polymers*, vol. 13, no. 9, 2021. doi: 10.3390/polym13091436.
- [6] K. L. Kuzmin, I. A. Timoshkin, S. I. Gutnikov, E. S. Zhukovskaya, Y. V. Lipatov, and B. I. Lazoryak, "Effect of silane/nano-silica on the mechanical properties of basalt fiber reinforced epoxy composites," *Compos. Interfaces*, vol. 24, no. 1, pp. 13–34, Jan. 2017, doi: 10.1080/09276440.2016.1182408.
- [7] K. Seisa, V. Chinnasamy, and A. U. Ude, "Surface Treatments of Natural Fibres in Fibre Reinforced Composites: A Review," *Fibres Text. East. Eur.*, vol. 30, no. 2, pp. 82–89, 2022, doi: 10.2478/ftce-2022-0011.
- [8] Q. Wang, Y. Zhang, W. Liang, J. Wang, and Y. Chen, "Effect of silane treatment on mechanical properties and thermal behavior of bamboo fibers reinforced polypropylene composites," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 15, no. 33, 2020, doi: 10.1177/1558925020958195.
- [9] M. H. Zin, K. Abdan, N. Mazlan, E. S. Zainudin, and K. E. Liew, "The effects of alkali treatment on the mechanical and chemical properties of pineapple leaf fibres (PALF) and adhesion to epoxy resin," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 368, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/368/1/012035.
- [10] S. Kaliappan, L. Natrayan, P. V. A. Kumar, and A. Raturi, "Mechanical, fatigue, and hydrophobic properties of silane-treated green pea fiber and egg fruit seed powder epoxy composite," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 19, pp. 24061–24068, 2024, doi: 10.1007/s13399-023-04534-w.

- [11] F. Mulana, M. P. Aulia, Azwar, and S. Aprilia, "Coconut fiber and fly ash polymer hybrid composite treated silane coupling agent: Study on morphology, physical, mechanical, and thermal properties," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 50, no. July, pp. 10–19, 2024, doi: 10.1016/j.sajce.2024.07.008.
- [12] Y. Xie, C. A. S. Hill, Z. Xiao, H. Militz, and C. Mai, "Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 7, pp. 806–819, 2010, doi: 10.1016/j.compositesa.2010.03.005.
- [13] D. Prasetyo, W. W. Raharjo, and Ubaidillah, "Pengaruh penambahan coupling agent terhadap kekuatan mekanik komposit polyester-cantula dengan anyaman serat 3D angle interlock," *Mekanika*, vol. 12, no. 1, pp. 44–52, 2013.
- [14] F. Sem and E. B. V All, "Innovative multifunctional siloxane treatment of jute fiber surface and its effect on the mechanical properties of jute / thermoset composites," vol. 508, pp. 247–252, 2009, doi: 10.1016/j.msea.2009.01.043.
- [15] W. W. Raharjo, R. Soenoko, Y. S. Irawan, and A. Suprpto, "The Influence of Chemical Treatments on Cantala Fiber Properties and Interfacial Bonding of Cantala Fiber/Recycled High Density Polyethylene (rHDPE)," *J. Nat. Fibers*, vol. 15, no. 1, pp. 98–111, 2018, doi: 10.1080/15440478.2017.1321512.
- [16] P. J. Herrera-Franco and A. Valadez-González, "A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 36, no. 8, pp. 597–608, 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2005.04.001.
- [17] N. Sumrith and R. Dangtungee, "Mechanical Properties of Water Hyacinth Fiber Reinforced Bio-Based Epoxy Composite," *Key Eng. Mater.*, vol. 818, pp. 7–11, Aug. 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.818.7.
- [18] G. O. A. AL-Fakih, R. A. Ilyas, M. R. M. Huzaifah, and A. S. El-Shafay, "Recent advances in sago (Metroxylon sagu) fibres, biopolymers, biocomposites, and their prospective applications in industry: A comprehensive review," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 269, p. 132045, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132045>.
- [19] M. Jacob, S. Joseph, L. A. Pothan, and S. Thomas, "A study of advances in characterization of interfaces and fiber surfaces in lignocellulosic fiber-reinforced composites," *Compos. Interfaces*, vol. 12, no. 1–2, pp. 95–124, 2005, doi: 10.1163/1568554053542115.
- [20] A. Das and E. Arunan, "Unified classification of non-covalent bonds formed by main group elements: a bridge to chemical bonding," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 25, no. 34, pp. 22583–22594, 2023, doi: 10.1039/d3cp00370a.
- [21] M. Aravindh et al., "A Review on the Effect of Various Chemical Treatments on the Mechanical Properties of Renewable Fiber-Reinforced Composites," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2009691.
- [22] M. Mohammed et al., "Interfacial Bonding Mechanisms of Natural Fibre-Matrix Composites: An Overview," *BioResources*, vol. 17, no. 4, pp. 7031–7090, 2022, doi: 10.15376/BIORES.17.4.MOHAMMED.
- [23] Y. Seki, "Innovative multifunctional siloxane treatment of jute fiber surface and its effect on the mechanical properties of jute/thermoset composites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 508, pp. 247–252, May 2009, doi: 10.1016/j.msea.2009.01.043.
- [24] M. Yang, J. Su, Y. Zheng, C. Fang, W. Lei, and L. Li, "Effect of Different Silane Coupling Agents on Properties of Waste Corrugated Paper Fiber / Polylactic Acid Composites," pp. 1–15, 2023.