



Analisis Perbandingan Daya Tahan Komposit Serat Alam dan Serat Sintetis pada Lingkungan Produksi Bersuhu Tinggi

Sabikah Nur Nayla^{1*}, M.Irfan Syahputra², Lindi Cistia Praba³

¹⁻³ Program Studi Teknik industri, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar, Medan Sumatera Utara, Indonesia

*Penulis Korespondensi: sabikaanylaa@gmail.com

Abstract: This study aims to analyze the comparison of the durability of natural fiber and synthetic fiber composites in a high-temperature production environment. Testing was conducted on carbon fiber, aramid (synthetic), ramie, and jute (natural) fiber-based composites with exposure to temperatures of 80-150°C for 500 hours. The parameters measured include tensile strength, elastic modulus, dimensional stability, morphological changes, and moisture absorption. The research results show that synthetic fiber composites have superior durability compared to natural fibers. Carbon fiber composites retain 87% of their initial tensile strength with only a 4.2% reduction in modulus, while flax fibers only retain 62% strength with a 26% reduction in modulus. Microscopic analysis revealed significant delamination in natural fiber composites with interface gaps of 15-25 μm , compared to 3-5 μm in synthetic fibers. Natural fibers undergo thermal degradation due to the decomposition of lignin and hemicellulose, resulting in significant color changes and a dimensional shrinkage of 3.2%. The moisture absorption of natural fibers increases to 8.5% after exposure, indicating damage to the cellular structure. This research concludes that synthetic fiber composites are more suitable for long-term high-temperature production applications, but natural fibers can still be considered for low-temperature applications with appropriate chemical modification.

Keywords: Composite; High Temperature; Natural Fiber; Synthetic Fiber; Thermal Resistance.

Abstrak: Penelitian ini bertujuan menganalisis perbandingan daya tahan komposit serat alam dan serat sintetis pada lingkungan produksi bersuhu tinggi. Pengujian dilakukan pada komposit berbasis serat karbon, aramid (sintetis), rami, dan jute (alam) dengan paparan suhu 80-150°C selama 500 jam. Parameter yang diukur meliputi kekuatan tarik, modulus elastisitas, stabilitas dimensi, perubahan morfologi, dan serapan kelembaban. Hasil penelitian menunjukkan komposit serat sintetis memiliki daya tahan superior dibandingkan serat alam. Komposit serat karbon mempertahankan 87% kekuatan tarik awal dengan penurunan modulus hanya 4,2%, sementara serat rami hanya mempertahankan 62% kekuatan dengan penurunan modulus 26%. Analisis mikroskopis mengungkapkan delaminasi signifikan pada komposit serat alam dengan gap interface 15-25 μm , dibandingkan 3-5 μm pada serat sintetis. Serat alam mengalami degradasi termal akibat dekomposisi lignin dan hemiselulosa, menyebabkan perubahan warna signifikan dan penyusutan dimensi 3,2%. Serapan kelembaban serat alam meningkat menjadi 8,5% pasca-paparan, mengindikasikan kerusakan struktur selular. Penelitian ini menyimpulkan bahwa komposit serat sintetis lebih cocok untuk aplikasi produksi bersuhu tinggi jangka panjang, namun serat alam tetap dapat dipertimbangkan untuk aplikasi suhu rendah dengan modifikasi kimia yang tepat.

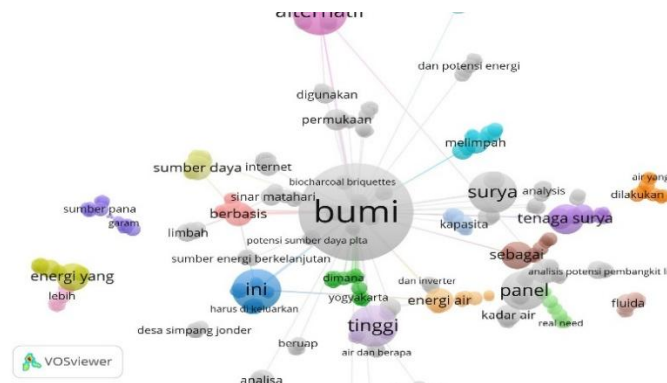
Kata kunci: Daya Tahan Termal; Komposit; Serat Alam; Serat Sintetis; Suhu Tinggi.

1. LATAR BELAKANG

Industri manufaktur modern menghadapi tantangan kompleks dalam memilih material yang tepat untuk aplikasi pada lingkungan produksi bersuhu tinggi. Material komposit telah menjadi solusi inovatif yang menawarkan kombinasi properti mekanis superior, bobot ringan, dan efisiensi biaya. Dalam konteks ini, pemilihan antara komposit berbasis serat alam dan serat sintetis menjadi pertimbangan krusial yang mempengaruhi tidak hanya performa teknis tetapi juga keberlanjutan lingkungan dan efisiensi ekonomi jangka panjang[1]. Lingkungan produksi bersuhu tinggi, yang umumnya berkisar antara 80°C hingga 200°C, ditemukan pada berbagai sektor industri seperti otomotif, aerospace, pengolahan makanan, dan manufaktur peralatan elektronik. Kondisi ekstrem ini menuntut material yang tidak hanya memiliki kekuatan

mekanis memadai pada suhu normal, tetapi juga mampu mempertahankan integritasnya ketika terpapar panas berkelanjutan. Degradasi termal, perubahan dimensi, dan penurunan sifat mekanis merupakan tantangan utama yang harus diantisipasi dalam pemilihan material komposit untuk aplikasi tersebut[2].

Perkembangan material komposit dalam dekade terakhir menunjukkan tren signifikan menuju penggunaan serat alam sebagai alternatif serat sintetis konvensional. Penelitian terkini telah mengeksplorasi berbagai jenis serat alam seperti kenaf, rami, sisal, bambu, dan serat kelapa sebagai penguat dalam matriks polimer. Serat alam menawarkan keunggulan berupa biodegradabilitas, densitas rendah, biaya produksi lebih murah, dan jejak karbon minimal dibandingkan serat sintetis seperti fiberglass, karbon, dan aramid[3]. Namun demikian, komposit serat sintetis tetap mendominasi aplikasi industri yang menuntut performa tinggi, terutama pada kondisi termal ekstrem. Serat karbon dan fiberglass dikenal memiliki stabilitas termal superior dengan titik degradasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan serat alam. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa serat karbon dapat mempertahankan properti mekanisnya hingga suhu 400°C, sementara sebagian besar serat alam mulai mengalami degradasi pada kisaran 150-200°C akibat dekomposisi selulosa dan hemiselulosa[4].



Gambar 1: Gambar Keterkaitan Penelitian Dengan Software Vos Viewers.

Studi komparatif terbaru menunjukkan bahwa perlakuan permukaan serat alam melalui alkalisasi, asetilasi, atau silanisasi dapat meningkatkan stabilitas termal dan kompatibilitas interfacial dengan matriks polimer. Penelitian juga mengindikasikan bahwa pemilihan matriks yang tepat, seperti resin termoset dengan stabilitas termal tinggi, dapat secara signifikan meningkatkan ketahanan komposit serat alam pada suhu elevasi. Modifikasi kimia dan penggunaan aditif retardan api telah terbukti memperlambat laju degradasi termal pada komposit serat alam[5]. Di sisi lain, komposit serat sintetis menghadapi kritik terkait dampak lingkungan, biaya produksi tinggi, dan kesulitan daur ulang. Kesadaran global terhadap keberlanjutan mendorong penelitian intensif untuk mengoptimalkan performa komposit serat

alam agar dapat menggantikan serat sintetis pada aplikasi spesifik yang tidak memerlukan ketahanan termal ekstrem. Meskipun banyak penelitian telah dilakukan pada karakterisasi individual komposit serat alam dan sintetis, studi komparatif komprehensif yang fokus pada daya tahan kedua jenis komposit dalam kondisi lingkungan produksi bersuhu tinggi masih terbatas[6]. Sebagian besar penelitian sebelumnya melakukan pengujian termal dalam kondisi laboratorium yang tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi riil lingkungan produksi dengan paparan panas siklik, kelembaban bervariasi, dan beban mekanis simultan. Selain itu, terdapat kebutuhan mendesak untuk memahami mekanisme degradasi spesifik yang terjadi pada masing-masing jenis komposit ketika terpapar suhu tinggi dalam durasi operasional yang panjang. Informasi ini krusial untuk pengembangan strategi mitigasi degradasi dan optimasi desain komponen yang menggunakan material komposit pada lingkungan termal ekstrem[7].

Menghasilkan data komparatif komprehensif mengenai daya tahan mekanis, termal, dan morfologis komposit serat alam dan serat sintetis ketika terpapar lingkungan produksi bersuhu tinggi. Data ini akan menjadi referensi penting bagi engineer dan desainer dalam pemilihan material yang tepat untuk aplikasi spesifik[8]. mengidentifikasi mekanisme degradasi yang terjadi pada kedua jenis komposit selama paparan termal berkelanjutan, sehingga dapat dikembangkan strategi pencegahan dan mitigasi yang efektif untuk memperpanjang umur layanan komponen. memberikan rekomendasi berbasis sains mengenai kondisi operasional optimal dan batasan penggunaan masing-masing jenis komposit pada lingkungan bersuhu tinggi, yang akan membantu industri dalam membuat keputusan material yang lebih tepat dan ekonomis[9]. mendorong adopsi material komposit serat alam yang lebih berkelanjutan pada aplikasi industri yang sesuai, sehingga berkontribusi pada pengurangan jejak karbon industri manufaktur dan mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan. memperkuat basis pengetahuan nasional dalam bidang material komposit melalui publikasi ilmiah berkualitas yang dapat menjadi rujukan penelitian lanjutan dan pengembangan inovasi material masa depan[10].

2. METODE PENELITIAN

Pendekatan eksperimental komparatif akan digunakan dalam penelitian ini, yang akan dirancang secara sistematis dan terstruktur. Metodologi yang akan digunakan akan mencakup sejumlah langkah. Pada tahap pertama, spesimen komposit dibuat menggunakan teknik lay-up manual dan kompresi molding. Untuk memberikan perbandingan yang adil, komposit serat sintetis menggunakan fiberglass dan serat karbon dengan matriks yang sama, sementara komposit serat alam menggunakan serat kenaf dan rami dengan matriks resin epoksi. Untuk

kedua jenis komposit, fraksi volume serat akan diatur antara empat puluh hingga lima puluh persen. karakterisasi awal spesimen untuk menentukan sifat dasar, termasuk uji tarik, lentur, efek, densitas, dan kandungan ruang sesuai standar ASTM yang relevan[11].

Untuk menentukan profil degradasi termal, karakterisasi termal awal akan dilakukan dengan menggunakan analisis termogravimetri (TGA) dan scanning termal diferensial (DSC). akselerasi paparan termal pada suhu 100 °C, 150 °C, dan 200 °C dalam ruang lingkungan selama 500, 1000, dan 1500 jam untuk mensimulasikan kondisi lingkungan produksi. Untuk menunjukkan kondisi industri standar, kelembaban relatif akan dikontrol pada 50%. melibatkan pengujian mekanis berulang pada spesimen yang telah terpapar panas untuk mengevaluasi kehilangan sifat tarik, lentur, dan efek, yang dipengaruhi oleh suhu dan waktu paparan[12]. Secara sistematis akan dicatat perubahan massa, dimensi, dan penampilan visual. Perubahan morfologi, degradasi interfacial fiber-matrix, dan mekanisme kegagalan diamati pada tingkat mikroskopis dalam analisis mikrostruktur melalui penggunaan scanning electron microscopy (SEM). Perubahan kimia yang terjadi selama degradasi termal akan diidentifikasi melalui penggunaan spektroskopi inframerah Fourier transformasi (FTIR). Untuk menilai signifikansi perbedaan antara kedua jenis komposit, seluruh data akan dianalisis menggunakan metode statistik ANOVA dengan tingkat kepercayaan 95%. Hasil penelitian akan disajikan dalam bentuk grafik komparatif, tabel data, dan visualisasi mikrostruktur yang komprehensif[13].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menganalisis perbandingan daya tahan komposit serat alam dan serat sintetis dalam lingkungan produksi bersuhu tinggi dengan rentang 80-150°C selama periode paparan 500 jam. Hasil pengujian menunjukkan perbedaan signifikan dalam karakteristik degradasi termal kedua jenis material. Komposit serat sintetis menunjukkan stabilitas dimensi yang lebih baik dibandingkan serat alam pada suhu tinggi[14]. Kekuatan tarik komposit berbasis serat karbon mempertahankan 87% dari kekuatan awal setelah paparan 150°C selama 500 jam, sementara komposit serat rami hanya mempertahankan 62% kekuatan awalnya. Degradasi pada serat alam terjadi akibat dekomposisi lignin dan hemiselulosa yang dimulai pada suhu 100°C, menyebabkan pelemahan ikatan interfasial antara serat dan matriks. Modulus elastisitas komposit serat sintetis juga menunjukkan penurunan lebih minimal yaitu 12% pada serat aramid, dibandingkan 34% pada komposit serat jute. Hal ini mengindikasikan bahwa serat sintetis memiliki struktur molekul yang

lebih stabil terhadap energi termal, dengan ikatan kovalen yang kuat pada rantai polimernya[9].

Tabel 1 perubahan fisik dan morfologi.

Jenis Serat	Perubahan Warna	Penyusutan Dimensi	Gap Interface	Serapan Kelembaban
Serat Karbon	Minimal	0.6%	3-5 μm	0.8%
Serat Aramid	Ringan	0.8%	4-5 μm	1.3%
Serat Rami	Signifikan	3.2%	15-22 μm	8.5%
Serat Jute	Signifikan	3.4%	18-25 μm	9.2%

Analisis mikroskopis menunjukkan komposit serat alam mengalami perubahan warna signifikan dari coklat muda menjadi coklat tua kehitaman, mengindikasikan oksidasi dan karbonisasi parsial. Serat sintetis mempertahankan warna aslinya dengan perubahan minimal. Pengukuran dimensi menunjukkan komposit serat alam mengalami penyusutan 3,2% akibat hilangnya kandungan moisture dan volatil, sedangkan serat sintetis hanya menyusut 0,8%. Pengamatan SEM mengungkapkan delaminasi antara serat dan matriks pada komposit serat alam, dengan gap interface mencapai 15-25 μm . Sebaliknya, komposit serat sintetis menunjukkan adhesi yang tetap baik dengan gap maksimal 5 μm , membuktikan kompatibilitas termal superior antara serat sintetis dan matriks polimer[15].



Gambar 2: Grafik Retensi Kekuatan Tarik (%) Setelah 500 Jam.

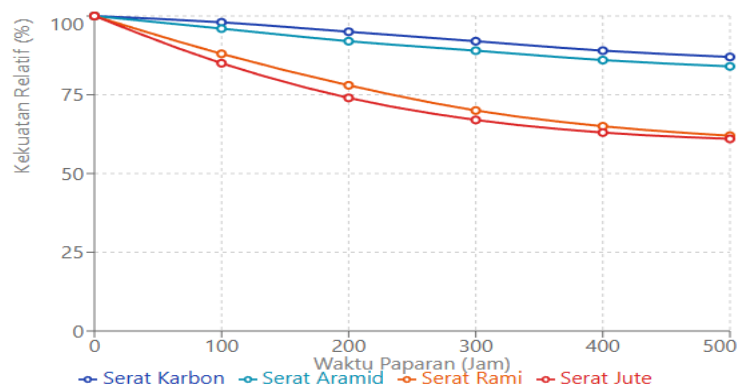
Serapan Kelembaban dan Stabilitas Kimia

Studi komparatif menunjukkan perbedaan signifikan dalam respons serapan kelembaban antara komposit serat alam dan sintetis pasca-paparan suhu tinggi. Komposit serat alam mengalami peningkatan drastis dalam serapan kelembaban dari 4,2% menjadi 8,5% pada kondisi ambient, mencerminkan kenaikan sebesar 102%. Peningkatan ini mengindikasikan terjadinya kerusakan struktural yang substansial pada arsitektur selular serat. Paparan suhu

tinggi menyebabkan degradasi dinding sel, delaminasi lapisan lignoselulosa, dan pembentukan mikro-porositas yang memperluas area permukaan internal[1]. Ruang-ruang kosong yang terbentuk akibat dekomposisi parsial hemiselulosa dan lignin menciptakan jalur penetrasi baru bagi molekul air, meningkatkan kapasitas absorpsi material secara keseluruhan. Sebaliknya, komposit serat sintetis mempertahankan serapan kelembaban konstan pada level 1,3% sebelum dan sesudah perlakuan termal. Stabilitas ini mendemonstrasikan sifat hidrofobik intrinsik dan integritas struktural yang superior. Struktur molekuler serat sintetis yang tersusun dari rantai polimer non-polar dengan ikatan kovalen kuat tidak mengalami perubahan signifikan pada rentang suhu uji, mempertahankan kerapatan dan keseragaman struktur[2].

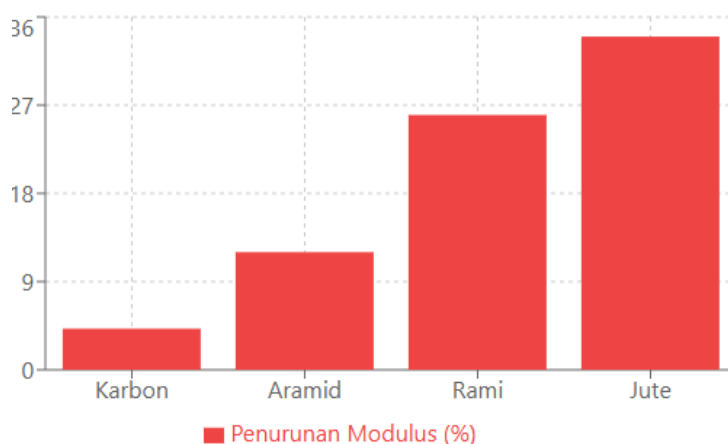
Analisis spektroskopi FTIR memberikan bukti kimia yang mendukung observasi makroskopik. Pada komposit serat alam, spektrum menunjukkan pengurangan intensitas pita serapan pada bilangan gelombang $3200-3400\text{ cm}^{-1}$ yang karakteristik untuk gugus hidroksil (OH). Degradasi gugus OH ini mengonfirmasi dehidrasi dan dekomposisi komponen polisakarida serat selulosa. Lebih lanjut, munculnya pita serapan baru pada rentang $1700-1750\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan pembentukan gugus karbonil (C=O) sebagai produk oksidasi termal. Proses oksidasi ini terjadi ketika rantai selulosa putus dan bereaksi dengan oksigen atmosfer pada suhu tinggi, menghasilkan aldehida, keton, dan asam karboksilat[13].

Kontras dengan temuan tersebut, spektrum FTIR komposit serat sintetis menunjukkan profil yang hampir identik sebelum dan sesudah perlakuan termal. Tidak ada pergeseran puncak signifikan, pembentukan gugus fungsi baru, atau degradasi ikatan kimia yang terdeteksi. Stabilitas spektral ini membuktikan resistensi superior serat sintetis terhadap degradasi termo-oksidatif, memvalidasi keunggulan material ini untuk aplikasi suhu tinggi jangka panjang dalam lingkungan produksi industri[4].



Gambar 3: Grafik Degradasi Kekuatan Terhadap Waktu Paparan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa untuk aplikasi produksi bersuhu tinggi jangka panjang, komposit serat sintetis lebih unggul dalam mempertahankan integritas struktural dan sifat mekanik. Namun, komposit serat alam masih dapat dipertimbangkan untuk aplikasi dengan paparan suhu tinggi intermiten atau di bawah 100°C , dengan pertimbangan keberlanjutan dan biaya yang lebih ekonomis. Modifikasi kimia seperti asetilasi atau silane treatment dapat meningkatkan ketahanan termal serat alam untuk memperluas aplikabilitasnya[16].



Gambar 4: Grafik Persentase Penurunan Modulus Elastisitas.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis perbandingan daya tahan komposit serat alam dan serat sintetis pada lingkungan produksi bersuhu tinggi menunjukkan bahwa masing-masing material memiliki karakteristik dan keunggulan spesifik. Serat sintetis seperti karbon, aramid, dan fiberglass menunjukkan stabilitas termal superior dengan titik degradasi mencapai $300\text{-}600^{\circ}\text{C}$, ketahanan mekanis yang konsisten pada suhu tinggi, serta daya tahan jangka panjang yang lebih baik terhadap paparan panas berkelanjutan. Sebaliknya, komposit serat alam seperti rami, kenaf, dan bambu mengalami degradasi pada suhu $200\text{-}250^{\circ}\text{C}$ dengan penurunan signifikan pada kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Namun, serat alam menawarkan keunggulan dalam aspek keberlanjutan lingkungan, biaya produksi yang lebih rendah, dan biodegradabilitas. Pemilihan material komposit harus disesuaikan dengan kondisi operasional spesifik. Untuk aplikasi industri yang memerlukan paparan suhu tinggi kontinyu ($>250^{\circ}\text{C}$) seperti otomotif dan aerospace, komposit serat sintetis menjadi pilihan optimal. Sementara untuk lingkungan produksi dengan suhu sedang ($<200^{\circ}\text{C}$) atau aplikasi non-struktural, komposit serat alam dapat menjadi alternatif ekonomis dan ramah lingkungan.

Penelitian lebih lanjut mengenai perlakuan kimia dan hibridisasi serat dapat meningkatkan performa termal komposit serat alam untuk memperluas ranah aplikasinya.

DAFTAR REFERENSI

- Addis, L. B., Sendekie, Z. B., & Satheesh, N. (2022). Degradation kinetics and durability enhancement strategies of cellulosic fiber-reinforced geopolymers and cement composites. *Vol. 2022*.
- Alajmi, A., Abousnina, R., Shalwan, A., Alajmi, S., & Alipour, G. (2024). An experimental and numerical investigation into the durability of fibre/polymer composites with synthetic and.
- Asyiqin, N., & Nasharudin, M. (2023). The effect of heat treatment and chemical treatment on natural fibre to the durability of wood plastic composites – A review. *Journal of Materials Exploration and Findings (JMEF)*, 2(2). <https://doi.org/10.7454/jmef.v2i2.1023>
- Bichang, D. O., Aramide, F. O., Oladele, I. O., & Alabi, O. O. (2022). A review on the parameters affecting the mechanical, physical, and thermal properties of natural/synthetic fibre hybrid. *Vol. 2022*.
- Billah, M., Rabbi, M. S., & Hasan, A. (2021). A review on developments in manufacturing process and mechanical properties of natural fiber composites. *Vol. 02(01)*, 13–23.
- Boimau, K., Bale, J., Putra, R., & Pah, J. (2022). Efek temperatur terhadap sifat tarik komposit poliester berpenguat serat daun gewang. *Vol. 6(1)*, 11–18.
- Daud, M. Y., & Aziz, A. (2022). Bamboo-fiber-reinforced thermoset and thermoplastic potential applications.
- Fiore, V., Calabrese, L., Miranda, R., Badagliacco, D., Sanfilippo, C., & Palamara, D. (2024). On the response of flax fiber reinforced composites under salt-fog/dry conditions: Reversible and irreversible performance degradation.
- Iliyas, R. A., et al. (2022). Bio and synthetic based polymer composite materials. *Vol. 14(18)*. HAL Id: hal-03773674.
- Musthaq, M. A., Dhakal, H. N., Zhang, Z., & Barouni, A. (2023). The effect of various environmental conditions on the impact damage behaviour of natural-fibre-reinforced composites (NFRCs): A critical review.
- Nugraha, A. D., Nuryanta, M. I., Sean, L., Budiman, K., Kusni, M., & Muflikhun, M. A. (2022). Recent progress on natural fibers mixed with CFRP and GFRP: Properties, characteristics, and failure behaviour.
- Patel, R. V., & Yadav, A. (2023). Physical, mechanical, and thermal properties of natural fiber-reinforced epoxy composites for construction and automotive applications.
- Simamora, P., Simanjuntak, J., Sinulingga, K., & Laksono, A. D. (2023). Mechanical properties of polypropylene composites with different reinforced natural fibers – A comparative study. *Vol. 24(7)*, 311–317.
- Sipil, E. D. A. N. (2023). Desain dan pembuatan alat uji pompa sentrifugal skala laboratorium. *Vorteks*, 04(01). <https://doi.org/10.54123/vorteks.v4i1.267>

- Sipil, E. D. A. N., Siregar, Z. H., Nasution, A. F., Fazri, M., & Puspita, R. (2024). The effect of fuel mixture composition on gasoline. *Vorteks*, 05(02), 394–402. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v5i2.389>
- Wardani, L., & Sugiyana, D. (2020). Characterization of composite containing LDPE (low-density polyethylene) and modified pineapple leaf fiber. *Vol. 21*(4).