

Pengujian Kekuatan Retak Komposit Arang Tempurung yang Dihaluskan Sebagai Bahan Baku Pengganti Kayu untuk Kapal Nelayan

¹⁾*Nusyirwan, ¹⁾Mutya Rani

¹⁾Departemen Studi Teknik Mesin, Universitas Andalas Padang
Jl. Limau Maniah Kota Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*Email: nusyirwan1802@gmail.com

Diterima: 30.09.2023, Disetujui: 05.04.2024, Diterbitkan: 17.05.2024

ABSTRACT

Coconut shell charcoal is a by-product waste from coconut farming which is very abundant and its use has not been optimally applied other than being limited to burning it for boiler energy as a heater and other parts of it being used as a fuel source for cooking. As raw materials for making wooden boats for fishermen in Indonesia become increasingly scarce, efforts are needed to find replacement materials in the supply process. However, another very urgent factor is that it is absolutely necessary to develop environmentally friendly composites to replace synthetic composites which are difficult to decompose. However, composite materials made from natural fibers still have many weaknesses, including low mechanical strength, therefore applications in the engineering field are still under study and development. Some of the weaknesses of natural fiber composite materials, which need to be studied, include their brittle nature and easy cracking. One of the things carried out in this research is a synthetic material derived from unsaturated polyester reinforced with natural fibers from coconut shell charcoal particles which is used to reduce the percentage of synthetic material from polyester which can form a composite that is easily decomposed. From the research, the mechanical strength obtained with a polyester mixture matrix reinforced with coconut shell charcoal fibers obtained crack resistance values with a large critical stress intensity factor based on ASTM D 5405 by varying the composition of the shell charcoal fiber mixture from: 0%, 10%, 20%, to 30%. From the test results, the largest critical stress intensity factor at $K_{1c} = 1.624$ (MPa/m^{1/2}) occurred in 20% coconut shell charcoal fiber.

Keywords: *eco-friendly-composites, polyester, stress intensity factor*

ABSTRAK

Arang tempurung kelapa merupakan limbah hasil sampingan dari pertanian kelapa yang sangat melimpah dan pemanfaatannya belum optimal diaplikasikan selain hanya sebatas dibakar untuk energi boiler sebagai pemanas dan sebagian lain dipakai sumber bahan bakar untuk masak. Seiring dengan semakin langkanya bahan baku untuk pembuatan kapal kayu untuk nelayan di Indonesia maka perlu upaya mencari material pengganti dalam proses penyediaannya. Namun faktor lain yang sangat mendesak adalah untuk pengembangan komposit ramah lingkungan merupakan hal mutlak digunakan untuk menggantikan komposit sintetis yang sulit terurai. Namun Material komposit dari serat alam masih banyak mempunyai kelemahan diantaranya kekuatan mekanik yang masih rendah, maka dari itu untuk penerapan bidang rekayasa masih dalam pengkajian dan perkembangan. Beberapa hal kelemahan dari material komposit serat alam, yang perlu dikaji antara lain, adalah sifat getas dan mudah retak. Salah satu yang dilakukan pada penelitian ini yaitu bahan sintetis yang berasal dari poliester tak tak jenuh diperkuat dengan serat alamiah dari partikel arang tempurung kelapa yang digunakan untuk mengurangi prosentase bahan sitetis dari poliester yang dapat membentuk komposit yang mudah terurai. Dari penelitian diperoleh kekuatan mekanik dengan matriks campuran polyester dengan diperkuat dengan serat arang tempurung kelapa diperoleh nilai ketahanan retak dengan faktor intensitas tegangan kritis yang besar berdasarkan ASTM D 5405 dengan memvariasikan komposisi campuran serat arang tempurung dari: 0%, 10%, 20%, sampai 30%. Dari hasil pengujian faktor intensitas tegangan kritis terbesar pada $K_{1c} = 1.624$ (MPa/m^{1/2}) terjadi pada serat arang tempurung kelapa 20%.

Kata kunci: *komposit-ramah-lingkungan, poliester, faktor intensitas tegangan*

I. Pendahuluan

Pemakaian material komposit dari bahan polimer partikel arang tempurung kelapa dikembangkan untuk pengganti material logam pada konstruksi transportasi seperti mobil dan kapal nelayan, kendaraan ringan dan sistem transportasi lainnya (Hiremath et., 2020; [2][3]). Dengan mengganti material logam dengan material komposit yang lebih ringan energi penggerak kendaraan lebih bisa dikurangi dengan signifikan ([4][5][1][3]). Partikel arang tempurung merupakan limbah sisa pengolahan pertanian perkebunan kelapa yang sangat melimpah dan pemanfaatannya belum banyak dimanfaatkan selain hanya sebatas dibakar untuk energi boiler sebagai pemanas. Seiring dengan semakin langkanya bahan baku untuk pembuatan kapal kayu untuk nelayan di Indonesia khususnya ([6][7][8]). Salah satu yang menentukan kualitas dari papan komposit adalah mudahnya material tersebut mengalami keretakan. Salah satu kelebihan komposit dari material polimer adalah mempunyai densitas yang rendah dan mudah dibentuk. Untuk dapat menggantikan komponen konstruksi dari logam maka material polimer harus memenuhi persyaratan tertentu ([2][9][10][11]). Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi adalah polimer tidak bersifat getas dan mudah retak ([5][12][7]). Resin *polyester* salah satu material polimer yang banyak digunakan untuk pembuatan matriks komposit karena mempunyai daya ikat yang baik dengan serat untuk membentuk komposit ([9][13]). Untuk memperkuat material komposit harus ditambahkan material serat bisa dari serat sintetis atau serat alam yang sesuai dengan keinginan ([14][5][15]).

Material komposit yang baik adalah mempunyai kekuatan mekanik yang cukup dan disamping itu memenuhi efek tidak merusak lingkungan, mudah didaur ulang dan mudah terurai ([16][17]). *Polyester* yang diperkuat oleh serat sintetis seperti serat karbon pemakaiannya telah mencapai kemajuan yang sangat pesat seperti untuk mobil mewah dan pesawat terbang dan komponen transportasi lainnya ([18][14][19]). Komposit dengan serat sintetis dibuat dari minyak bumi untuk itu perlu dikurangi karena menimbulkan efek samping yang dapat merusak lingkungan dan yang menimbulkan efek lain terhadap limbah yang dihasilkannya ([20][21]).

Berbagai penelitian untuk membuat material komposit yang mudah terurai adalah dengan mencampur dengan bahan alam seperti dari kelapa serat sawit dan material alam lainnya seperti serat rami, serat knaf, serat sekam padi dan serat alamiah lainnya. Beberapa kajian terdahulu telah melaporkan pengaruh penambahan serat sekam padi dan minyak CPO untuk peningkatan ketangguhan *polyester* terhadap ketahanan retak, beban tarik dan beban lentur ([13][4][14]).

Untuk peningkatan ketahanan retak *polyester* terhadap penambahan partikel arang tempurung dan serat kelapa sawit tidak diperoleh informasi yang lengkap dari ([15][22][23]). Untuk peningkatan sifat ketahanan retak polimer *polyester tak jenuh (unsaturated polyester) disingkat dengan (UP)* dengan menambahkan penguatan dari serat sekam padi akan mengubah sifat getas polimer tersebut jika ditambahkan dengan berbagai prosentase campuran tertentu ([14][19]).

Pada penelitian ini akan dilakukan pengkajian tentang penambahan material partikel arang tempurung (AT) untuk mengubah sifat getas *polyester murni (UP)* menjadi lebih tangguh sehingga dapat meningkatkan sifat ketahanan retaknya.

II. Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan komposit mono fiber yang terdiri dari satu jenis bahan alam dari serat partikel arang tempurung yang dicampur dengan *polyester* secara seragam. Proses pembuatannya dengan cara menuangkan resin ke dalam cetakan yang berisi kaca, kemudian diberikan tekanan sambil meratakan dengan roller atau kuas. Proses ini diulang sampai ketebalan yang dibutuhkan tercapai.

Penyiapan Material untuk Penelitian

Untuk membentuk material komposit kita membutuhkan dua jenis material yaitu material sebagai matriks untuk pengikat dari material dari partikel arang tempurung untuk membuat material komposit yang lebih kuat. Perpaduan sifat mengikat dari material matriks *polyester* terhadap arang tempurung diharapkan

terbentuk material komposit yang bermanfaat pada bidang konstruksi rekayasa.

1. Material Matriks

Polyester yang digunakan pada penelitian ini ditujukan untuk membentuk matriks pengikat dari serat alam yang berasal dari partikel arang tempurung untuk membentuk material komposit. Tujuannya adalah campuran polyester dan partikel arang tempurung yang seragam dapat meningkatkan sifat ketahanan retak dari material komposit yang lebih baik ([4][5][1][3]).

Beberapa sifat ciri-ciri dari diantaranya: memiliki sifat mudah mengikat serat, resistensi terhadap kelembaban dan memiliki kekuatan mekanik cukup baik, kepadatan yang tinggi dan cepat kering. Jenis *polyester* yang digunakan pada penelitian ini adalah resin polyester (polyester tak jenuh) dengan produk Yukalac 1560 BL-EX. Sifat-sifat mekanik polyester dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1. Sifat Fisik Polyester

Besaran	Satuan	Harga
Tengangan Tarik Maksimum	MPa	20-100
Modulus Elastik	GPa	2.1- 4.1
Strain Ultimet	%	1- 6
Poisson's ratio	-	-
Densitas	g/cm ³	1.0 – 1.45



Gambar 1. Polyester dalam wadah kemasan

2. Material Penguat

Untuk memperoleh material komposit dibutuhkan material serat untuk penguat jenis serat yang dipakai bisa berupa serat sintetis atau juga bisa berupa serat yang berasal dari

serat alam. Pada penelitian ini serat yang dipilih serat yang berasal dari partikel arang tempurung. Alasan pemilihannya adalah arang tempurung ini merupakan material yang belum dimanfaatkan secara optimal dan kelebihan pembuatan cukup mudah dan keterikatan antara material matriks dan material penguat dapat terikat dengan baik dan seragam yang dapat meningkatkan sifat ketahanan retak dari material komposit yang lebih baik([24][25][6]).



Gambar 2. Partikel arang tempurung

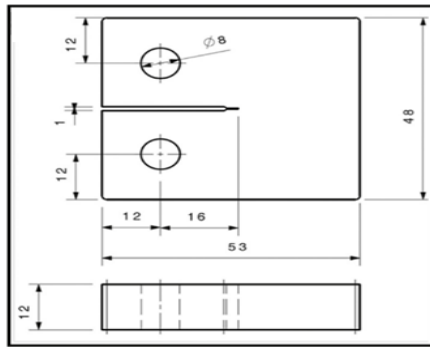
3. Peralatan Penelitian

Untuk mencampurkan material agar tercampur sempurna digunakan sebuah pengaduk. Pengaduk yang dipakai adalah jenis pengaduk magnet hot plate adalah peralatan untuk mencampurkan material matriks dan penguat dengan yang suhu dapat dikontrol sesuai keinginan ,agar material komposit terbentuk dengan baik. Spesifikasi pengaduk magnet hot plate adalah sebagai berikut; Spesifikasi pengaduk magnet hot plate adalah sebagai berikut; Spesifikasi Dagang Daihan Scientific, Model MS-H280-Pro, Suhu Kerja 25– 280 °C, kecepatan putaran 0 – 1500 rpm.



Gambar 3. Pengaduk hot plate

Untuk membuat material komposit diperlukan sebuah cetakan yang dapat membuat material dengan dimensi yang sesuai dengan mengacu pada dimensi standae mengikutu standar ASTM D5405 yang dapat dilihat pada gambar 4.



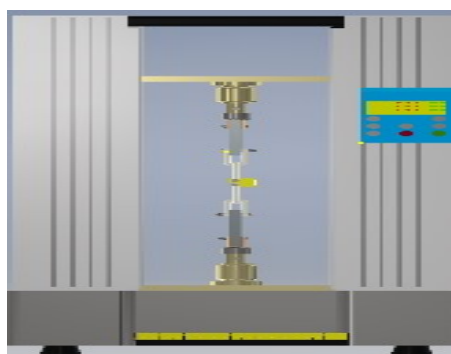
Gambar 4. Dimensi specimen uji sesuai dengan Standar D 5405

Untuk membuat material komposit perlu dibuat suatu cetakan yang sesuai dengan ASTM D 5405 yang disusun secara acak merata dengan bentuk cetakan dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Cetakan material komposit

Untuk melakukan pengujian retak material komposit digunakan mesin retak Tarik vertical dua sisi bergerak vertikal, sesuai standar acuan yaitu ASTM D5405, dimensinya dapat dilihat pada Gambar 5. Alat ini akan dapat bekerja dengan menginput data spesifikasi material yang dibutuhkan untuk menghitung kekuatan retak spesimen material uji. Data pamplet mesin uji retak adalah sebagai berikut; Mesin uji merek COM-TEN 95T Seri 5K, Kapasitas 5000 Pound, Load Cell Model TSB0050, dengan sistem tampilan pada layer monitor.



Gambar 6. Mesin uji retak material komposit

Untuk melakukan penelitian material direncanakan dengan komposisi yang telah

sesuai dengan literatur yang telah dikaji sebelumnya. Komposisi dari material untuk penelitian terdiri dari polyester dan ampas serat tebu dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Campuran Spesimen Uji

Material	Komposisi UP (wt %)	Komposisi AT (wt %)
UP/AT	100	0
UP/AT	90	10
UP/AT	80	20
UP/AT	70	30



Gambar 7. Spesimen uji retak material komposit

persamaan matematika yang digunakan untuk menghitung kekuatan retak material adalah sebagai berikut.

$$K_{Ic} = \frac{P}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{w}\right) \left\{0.886 + 4.64\left(\frac{a}{w}\right) - 13.32\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{w}\right)^4\right\}}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \quad (2)$$

Mesin uji retak berfungsi untuk melakukan uji retak dengan melakukan gerakan vertical dua arah yang berlawanan untuk melakukan penarikan pada material uji retak dapat bergerak seiring dengan bertambahnya beban naik secara otomatis bila material melakukan perlawanan.

III. Hasil dan Pembahasan

1. Hasil Pengujian Retak

Hasil pengujian terhadap masing-masing specimen uji retak dapat ditunjukkan dari pembacaan Monitor Komputer yang telah terhubung langsung secara otomatis pada mesin uji retak. Data yang terbaca pada monitor adalah harga Beban Retak Maksimal (*Force Tensile Toughness*) dan perpindahan (Displacement) dari Material Uji. Harga beban Retak Maksimal dari masing-masing sampel hasil pengujian Mesin Uji Retak dapat dilihat pada Gambar 8 dan pada Tabel 4. Selanjutnya dihitung *Faktor Intensitas tegangan Kritis* (K_{1c}) dengan persamaan (2) untuk pada masing-masing specimen. Hasil dari pengujian menunjukkan pada *campuran un-saturated polyester* dan serat arang kelapa 80% : 20% diperoleh nilai *Faktor Intensitas Tegangan kritis* maksimal sebesar K_{1c} 1.624 ($\text{MPa}/\text{m}^{1/2}$).

Tabel 3. Data Dimensi Spesimen Uji Retak

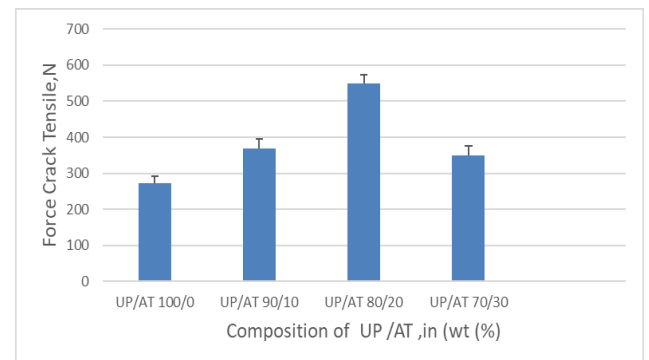
UP/AT C (%)	Spesimen	a (cm)	a/W	F(a/W)
100/0	1	1.56	0.441	0.438
	2	1.58	0.441	0.438
	3	1.45	0.441	0.438
90/10	1	1.48	0.441	0.438
	2	1.52	0.441	0.438
	3	1.51	0.441	0.438
80/20	1	1.54	0.441	0.438
	2	1.56	0.441	0.438
	3	1.48	0.441	0.438
70/30	1	1.55	0.441	0.438
	2	1.49	0.441	0.438
	3	1.54	0.441	0.438

Tabel 4. Data Dimensi Spesimen Uji Retak

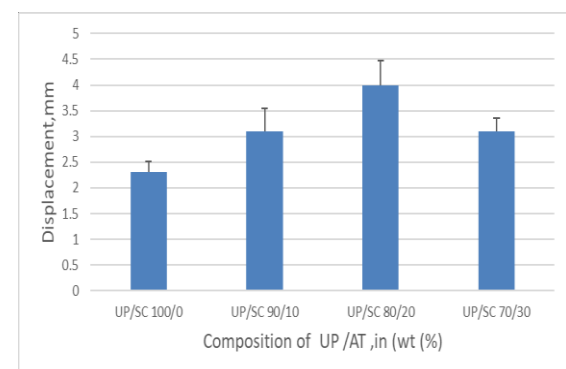
UP/AT (%)	Spesimen	Force (N)	K_{1c} (Mpa. m ^{1/2})	Rata-rata
100/0	1	272	0.907	0.746
	2	134	0.465	
	3	257	0.864	

90/10	1	350	1.216	1.230
	2	370	1.187	
	3	401	1.286	
80/20	1	418	1.453	1.624
	2	567	1.819	
	3	480	1.601	
70/30	1	418	1.328	1.077
	2	354	0.937	
	3	365	0.966	

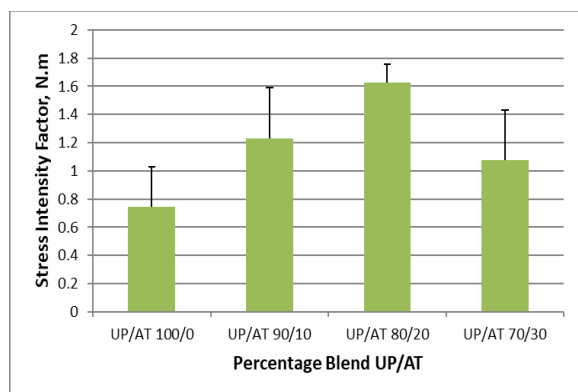
Pada Gambar 8 ditunjukkan hasil pembacaan pada monitor Mesin Uji Retak Beban Maksimal rata-rata diperoleh yang mampu ditahan oleh sampel Uji retak terdapat pada *campuran un-saturated polyester* dan serat arang tempurung 80% : 20% diperoleh yaitu sebesar 488,3 N, untuk semua specimen dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 8. Grafik Force Tensile Toughness terhadap Prosentase Campuran AT terhadap UP.



Gambar 9. Grafik Displacement terhadap Prosentase Campuran AT terhadap UP



Gambar 10. Grafik Stress Intensity Faktore terhadap Prosentase Campuran AT terhadap UP

IV. Kesimpulan

Penelitian ini melaporkan keberhasilan penentuan komposisi yang tepat dari campuran polimer yang terbuat dari matriks *polyester tak jenuh* dengan menambahkan partikel serat arang tempurung untuk meningkatkan kerapuhan polimer *polyester tak jenuh* menjadi tangguh. campuran yang dibuat dari matriks *polyester tak jenuh* dengan menambahkan partikel serat arang tempurung untuk meningkatkan kerapuhan polimer *polyester tak jenuh* menjadi bahan tahan retak. Dengan adanya penelitian ini maka rekayasa dalam bidang keteknikan khususnya di bidang bahan baku bodi kapal nelayan, badan kapal wisata, kapal nelayan sangat membantu. Campuran polyester tak jenuh dengan 20% AT ini memiliki faktor intensitas tegangan kritis tertinggi. Dengan kinerja tertinggi, material ini mampu menahan kekuatan retak yang baik, sehingga baik dan berguna untuk aplikasi teknik. Penelitian ini menghasilkan peningkatan ketangguhan dan ketahanan retak bahan *polyester murni* dengan perlakuan penambahan campuran AT pada bahan dasar polyester tak jenuh murni. Peningkatan ketangguhan patah $K_{1c} = 0.746$ (MPa/m^{0.5}). untuk polyester murni meningkat menjadi $K_{1c} 1.624$ (MPa/m^{0.5}).

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dekan Fakultas Teknik Universitas Andalas an Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah membiayai penelitian ini melalui skema Hibah Penelitian Dosen Jurusan Teknik Mesin Tahun Anggaran 2022.

Daftar Pustaka

- [1] N. Hiremath, S. Young, H. Ghossein, D. Penumadu, U. Vaidya, and M. Theodore, "Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 198, no. May, p. 108156, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108156.
- [2] M. Davallo, H. Pasdar, and M. Mohseni, "Mechanical properties of unsaturated polyester resin," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 2113–2117, 2010.
- [3] N. Nusyirwan *et al.*, "Methods for increasing fracture toughness of thermosetting polyester polymers with vinyl ester mixtures as raw materials for automotive components," *Indian J. Eng.*, vol. 20, no. 53, pp. 1–10, 2023, doi: 10.54905/disssi/v20i53/e20ije1648.
- [4] and D. H. H. Abrial, R. Fajrul, M. Mahardika, "Improving impact, tensile and thermal properties of thermoset unsaturated polyester via mixing with methyl methacrylate and thermoset vinyl ester," 2019.
- [5] D. Frómeta *et al.*, "Identification of fracture toughness parameters to understand the fracture resistance of advanced high strength sheet steels," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 229, no. February, p. 106949, 2020, doi: 10.1016/j.engfractmech.2020.106949.
- [6] N. Nusyirwan, P. Abiema, and A. Malik, "Methods Increased Fracture Toughness Thermosetting Polyester Mixture with Vinyl Ester for Raw Materials in Ship Bodies," vol. 1, no. 1, pp. 43–50, 2023.
- [7] N. Nusyirwan and S. Ilham, "Study of Improving Fracture Toughness of Unsaturated Polyester with Addition of Mixing Percentage of CPO Oils," vol. 2, pp. 132–137, 2022.
- [8] H. Adam, "Carbon fibre in automotive applications," *Mater. Des.*, vol. 18, no. 4–6, pp. 349–355, 1997, doi: 10.1016/s0261-3069(97)00076-9.

- [9] N. Adnan, H. Abral, D. H., and E. Staria, "Identification of Mechanical Strength for Mixture of Thermoset Polyester with Thermoset Vinyl Ester due to Bending Load," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 6, no. 1, pp. 19–25, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v6i1.14450.
- [10] N. Adnand, R. Mutya, F. Ridwan, H. Abral, H. Dahlan, and E. Satria, "Pengaruh Variasi Persentase Campuran Polymer Polyester dan Vinyl Ester Terhadap Kekuatan Tegangan Lentur," *Met. J. Sist. Mek. dan Termal*, vol. 5, no. 2, p. 126, 2021, doi: 10.25077/metal.5.2.126-131.2021.
- [11] Nusyirwan, F. Yande, H. Abral, Ihamdi, H. Dahlan, and E. Satria, "Effect of variations in load speed on fracture toughness of thermoset polyester/thermoset vinyl ester blend," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2592, no. March 1996, 2023, doi: 10.1063/5.0115043.
- [12] P. K. Naik, N. V. Londe, B. Yogesha, L. Laxmana Naik, and K. V. Pradeep, "Mode I Fracture Characterization of Banana Fibre Reinforced Polymer Composite," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 376, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/376/1/012041.
- [13] H. Ardhyananta *et al.*, "Mechanical and Thermal Properties of Unsaturated Polyester/Vinyl Ester Blends Cured at Room Temperature," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 202, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/202/1/012088.
- [14] Nusyirwan, H. Abral, M. Hakim, and R. Vadia, "The potential of rising husk fiber/native sago starch reinforced biocomposite to automotive component," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 602, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/602/1/012085.
- [15] A. T. Seyhan, M. Tanoğlu, and K. Schulte, "Tensile mechanical behavior and fracture toughness of MWCNT and DWCNT modified vinyl-ester/polyester hybrid nanocomposites produced by 3-roll milling," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 523, no. 1–2, pp. 85–92, 2009, doi: 10.1016/j.msea.2009.05.035.
- [16] Z. Yang, H. Peng, W. Wang, and T. Liu, "Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, no. 5, pp. 2658–2667, 2010, doi: 10.1002/app.
- [17] H. Abral *et al.*, "Improving impact, tensile and thermal properties of thermoset unsaturated polyester via mixing with thermoset vinyl ester and methyl methacrylate," *Polym. Test.*, vol. 81, no. August 2019, p. 106193, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106193.
- [18] A. Budiman and S. Sugiman, "Karakteristik Sifat Mekanik Komposit Serat Bambu Resin Polyester Tak Jenuh Dengan Filler Partikel Sekam," *Din. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 76–82, 2016, doi: 10.29303/d.v6i1.28.
- [19] H. Abral *et al.*, "Nanovoids in fracture surface of unsaturated polyester/vinyl ester blends resulting from disruption of the cross-linking of the polymer chain networks," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1062, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1062/1/012051.
- [20] S. Jeyanthi and J. Janci Rani, "Improving mechanical properties by KENAF natural long fiber reinforced composite for automotive structures," *J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 15, no. 3, pp. 275–280, 2012, doi: 10.6180/jase.2012.15.3.08.
- [21] Q. Meng and T. Wang, "An improved crack-bridging model for rigid particle-polymer composites," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 211, no. January, pp. 291–302, 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2019.02.028.
- [22] H. N. Dhakal and S. O. Ismail, *Unsaturated polyester resins: Blends, interpenetrating polymer networks, composites, and nanocomposites*. Elsevier Inc., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-816129-6.00008-9.
- [23] K. Liu, S. He, Y. Qian, Q. An, A. Stein, and C. W. Macosko, "Nanoparticles in Glass Fiber-Reinforced Polyester Composites: Comparing Toughening Effects of Modified Graphene Oxide

- and Core-Shell Rubber,” *Polym. Compos.*, vol. 40, no. S2, pp. E1512–E1524, 2019, doi: 10.1002/pc.25065.
- [24] N. Nusyirwan, A. Peronika, H. Abral, H. Dahlan, E. Satria, and A. Sutanto, “Unsaturated Polyester Fracture Toughness Mechanism With Blending To Vinyl Ester and Mma,” *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 17, no. 23, pp. 1990–1996, 2022.
- [25] N. Nusyirwan, M. Rani, and R. Pratama, “Identification of the fracture surface of thermoset polyester due to bending load,” vol. 7, no. 1, pp. 51–58, 2022, doi: 10.22219/jemmme.v7i1.23086.