Terbit *online* pada laman web jurnal : http://inomet.ft.unand.ac.id

**INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal**

ISSN (Online) 3025 - 2598

Rekayasa Material

# Kajian Peningkatan Ketangguhan Retak Material Komposit dari Poliester Tak Jenuh dengan Penguatan Serat Ampas Tebu

N. Nusyirwan [a], Yul Hizhar [a], Adam Malik [a]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Universitas Andalas, Limau Manih, Padang, 25163, Indonesia*

INFORMASI ARTIKEL

*Sejarah Artikel:*
Diterima Redaksi: 20 Juni 2024
Revisi Akhir: 28 Juni 2024
Diterbitkan *Online*: 30 Juni 2024

KATA KUNCI

Komposit

Poliester tak jenuh

Serat ampas tebu

Faktor intensitas tegangan

KORESPONDENSI

E-mail: yul_hizhar@eng.unand.ac.id

**A B S T R A C T**

The development of environmentally friendly composites must be carried out to reduce or replace synthetic composites that are difficult to decompose. However, composite materials from natural fibers still have several weaknesses, such as low mechanical strength, brittleness and easy cracking. This research mixed unsaturated polyester reinforced with natural fiber from sugarcane bagasse. Determination of the critical stress intensity factor was carried out based on ASTM D 5405 by varying the composition of the sugarcane bagasse fiber mixture from 10% to 30%. The test results showed that the largest critical stress intensity factor ($K_{1c}$) was 1.624 MPa/m$^{0.5}$ for 20% sugarcane bagasse fiber.

## 1. PENDAHULUAN

Pemakaian material komposit dari bahan polimer yang diperkuat dengan serat alam telah banyak dikembangkan untuk pengganti material logam pada bidang rekayasa konstruksi. Aplikasi dari material tersebut digunakan pada bidang konstruksi seperti bodi mobil, kapal pesiar, kendaraan ringan dan sistem transportasi lainnya [1-3]. Dengan mengganti material logam dengan material komposit yang lebih ringan dapat menghemat energi penggerak kendaraan secara signifikan [3-5]. Saat ini limbah serat tebu hasil penggilingan tebu sangat melimpah. Namun, pemanfaatannya belum optimal karena hanya sebagai sumber bahan bakar pada *boiler*. Seiring dengan semakin langkanya bahan baku untuk pembuatan kapal kayu khususnya bagi nelayan di Indonesia, maka pembuatan komposit dari serat ampas tebu merupakan sebuah alternatif untuk mengganti material konstruksi kapal [3,6,7]. Salah satu yang menentukan kualitas dari material komposit adalah kekuatan tegangan tarik dan kemampuan menahan keretakan akibat beban yang bekerja pada material tersebut. Salah satu kelebihan komposit dari material polimer adalah densitas yang rendah dan mudah dibentuk [6,8,9]. Sementara, polimer memiliki kelebihan tidak mudah mengalami keretakan [9-12]. Resin poliester merupakan salah satu material yang banyak digunakan untuk pembuatan matriks komposit [8,13]. Sifat mengikat sebagai resin

https://doi.org/10.25077/inomet.1.1.67-73.2024

Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

membuat poliester sangat bagus sebagai matriks pada komposit untuk dipakai bidang rekayasa konstruksi, sementara dari segi harga, beberapa material poliester memiliki harga yang murah [4-5]. Beberapa sifat dari poliester antara lain: mudah mengikat serat, tahan dari kelembaban, memiliki kekuatan mekanik yang cukup baik, kepadatan yang tinggi, dan cepat kering [5]. Material komposit dapat diperkuat dengan menambahkan serat sintetis atau serat alam yang sesuai sehingga memiliki kekuatan mekanik yang lebih tinggi [1,14,15]. Material komposit yang diharapkan adalah material dengan kekuatan mekanik yang cukup baik dan memenuhi efek tidak merusak lingkungan yaitu mudah didaur ulang dan mudah terurai [16-18].

Penggunaan poliester yang diperkuat serat sintetis seperti serat karbon telah mencapai kemajuan yang pesat seperti material mobil mewah, pesawat terbang, dan komponen transportasi lainnya [6,19,20]. Komposit serat sintetis adalah material yang berasal dari minyak bumi sehingga pemakaiannya perlu dikurangi karena menimbulkan efek samping merusak lingkungan akibat limbah yang dihasilkannya [21-22]. Berbagai penelitian untuk membuat material komposit yang mudah terurai telah banyak dilakukan, salah satunya adalah mencampur resin poliester dengan bahan alami berupa minyak kelapa sawit (*Crude Palm Oil*/CPO). Cara lain pembuatan material komposit tanpa material sintetis adalah dengan menggunakan material alami seperti serat rami, serat knaf, serat sekam padi dan serat alami lainnya.

Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan pengaruh penambahan minyak CPO untuk meningkatkan ketangguhan poliester terhadap ketahanan retak, beban tarik dan beban lentur [1,13,23]. Pengaruh penambahan serat sekam padi dan serat kelapa sawit terhadap peningkatan ketahanan retak resin poliester juga telah banyak dilaporkan pada penelitian terdahulu [15,24,26].

Penelitian ini mengkaji sifat ketahanan retak matriks resin poliester (*unsaturated polyester*/UP) yang ditambahkan material penguat berupa serat ampas tebu (*sugarcane*/SC) dengan persentase tertentu.

## 2. METODOLOGI

### *2.1. Material*

#### *2.1.1. Material Matriks*

Poliester tak jenuh *(Unsaturated Polyester/*UP*)* yang digunakan pada penelitian ini bertujuan untuk membentuk matriks pengikat serat alami berupa serat ampas tebu. Selanjutnya, campuran UP dan serat ampas tebu (*sugarcane*/SC) yang seragam diharapkan dapat meningkatkan sifat ketahanan retak dari material komposit. UP yang dipakai pada penelitian ini adalah Yukalac 1560 BL-EX dengan sifat-sifat fisiknya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat-sifat Fisik UP Yukalac 1560 BL-EX [8]

| **Sifat** | **Satuan** | **Nilai** |
|---|---|---|
| Tengangan tarik maksimum | MPa | 20-100 |
| Modulus elastisitas | GPa | 2.1- 4.1 |
| *Strain ultimate* | % | 1- 6 |
| *Poisson's ratio* | - | - |
| *Density* | $g/cm^3$ | 1.0 – 1.45 |
| $T_g$ | $^oC$ | 100 – 140 |

Beberapa nilai spesifikasi yang dibutuhkan untuk perhitungan kekuatan retak material pada Tabel 1 antara lain: kekuatan tarik maksimum, nilai modulus elastisitas, dan *density* material. Nilai-nilai tersebut merupakan data input mesin uji retak.

#### *2.1.2. Material Penguat*

Material penguat komposit dapat berupa serat sintetis atau bisa juga serat alami. Pada penelitian ini, serat yang digunakan adalah serat ampas tebu yang telah dihaluskan (Gambar 1) karena serat ini belum dimanfaatkan secara optimal sebagai hasil limbah industri pengolahan tebu. Proses yang dilakukan untuk mendapatkan serat tebu yang dihaluskan adalah serat dikeringkan dengan panas matahari dengan suhu 27 sampai 32°C selama lebih kurang 3 x 24 jam, kemudian serat tebu dihancurkan dengan mesin *blender* dan setelah itu serat tebu diayak dengan ayakan yang mempunyai lubang *screen* 100 mesh.

 https://doi.org/10.25077/inomet.1.1.67-73.2024



Gambar 1. Serat ampas tebu yang telah dihaluskan

Kelebihan serat ampas tebu antara lain memiliki kandungan lilin yang sedikit sehingga tidak terlalu banyak membutuhkan material pemurni seperti NaOH. Dengan demikian, diharapkan keterikatan antara material matriks dan material penguat dapat terjadi dengan baik dan seragam sehingga meningkatkan sifat ketahanan retak dari material komposit yang dibentuk [3,4,9].

### *2.2. Peralatan*

#### *2.2.1. Hot plate magnetic strirrer*

*Hot plate magnetic stirrer* (Gambar 2) berfungsi sebagai pengaduk campuran matriks dan penguat dengan termperatur yang bisa diatur sesuai dengan keinginan agar material komposit terbentuk dengan baik.



Gambar 2. *Hot plate magnetic stirrer*

Spesifikasi dari *hot plate magnetic stirrer* yang digunakan adalah sebagai berikut; merek: Daihan Scientific, model: MS-H280-Pro, temperatur kerja: 25 – 280°C, putaran: 0 – 1500 rpm.

#### *2.2.2. Cetakan*

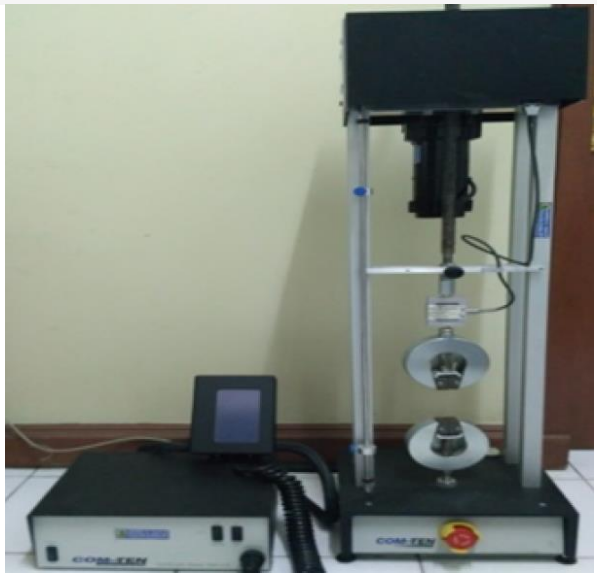
Cetakan dibutuhkan untuk membuat material komposit yang memenuhi dimensi uji retak Standar ASTM D5405 [27]. Cetakan yang digunakan berbahan akrilik seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Cetakan material komposit

#### *2.2.3. Mesin Uji Retak*

Mesin uji retak digunakan untuk pengujian retak sampel komposit (Gambar 4).



Gambar 4. Mesin uji retak COM-TEN 95T Series 5K

Data-data spesifikasi material sampel dapat diinputkan pada alat ini untuk keperluan analisis sifat kekuatan retak material tersebut. Spesifikasi mesin uji retak adalah sebagai berikut; merek: COM-TEN 95T Series 5K, kapasitas: 5000 pound, load cell model: TSB0050, monitor display: layer sentuh.

### *2.3. Prosedur Pengujian*

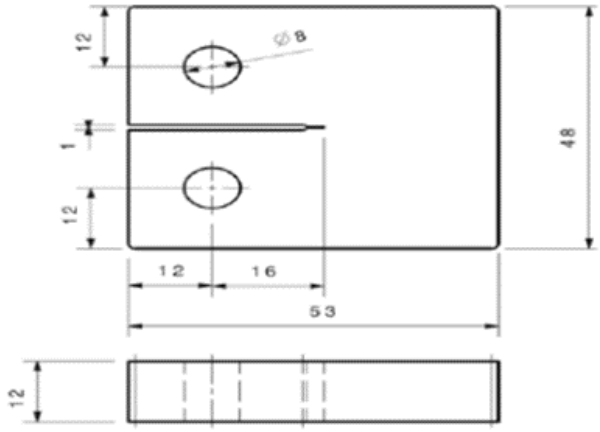
Komposisi material sampel komposit yang dibentuk dari campuran UP dan SC pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2. Sampel 1 merupakan sampel UP murni tanpa ada penambahan SC. Kemudian tiga sampel berikutnya berturut-turut memiliki komposisi UP/SC sebesar 90/10, 80/20, dan 70/30.

Variasi persentase UP dan SC ini dipilih berdasarkan pertimbangan variasi campuran UP pada berbagai serat alami yang telah dilakukan dalam penelitian-penelitian sebelumnya.

Tabel 2. Komposisi Material Komposit

| Sampel | UP (% wt) | SC (% wt) |
|---|---|---|
| 1 | 100 | 0 |
| 2 | 90 | 10 |
| 3 | 80 | 20 |
| 4 | 70 | 30 |

Pembuatan material komposit pada penelitian ini adalah menggunakan metode *hand-layup*, yaitu menuangkan resin poliester dengan tangan ke dalam cetakan yang berisi serat, kemudian diberikan tekanan sambil diratakan dengan *roller* atau kuas. Proses ini diulang sampai ketebalan yang dibutuhkan tercapai. Material yang telah dicetak dibiarkan kering selama 72 jam dalam ruangan bertemperatur kamar. Dimensi spesimen uji yang dicetak sesuai dengan Standar ASTM D5405 seperti yang terlihat pada Gambar 5.




Gambar 5. Dimensi spesimen uji retak sesuai Standar ASTM D5405

Setelah dilakukan proses pengujian retak komposit dengan mesin uji retak, hasil pengukuran dimasukkan ke dalam persamaan (1) dan (2) berikut:

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

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

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Salah satu tahapan penelitian ini adalah membuat spesimen komposit dari campuran UP dan SC seperti yang disajikan pada Tabel 2. Campuran komposit yang telah dicetak dan dikeringkan dapat dilihat pada Gambar 6. Masing-masing komposisi campuran dibuat sebanyak tiga buah spesimen untuk menjaga validitas hasil pengujiannya.




Gambar 6. Spesimen komposit yang telah dicetak dan dikeringkan

Hasil pengujian terhadap masing-masing spesimen uji retak dapat dilihat pada monitor komputer yang terhubung dengan mesin uji retak. Data yang ditampilkan pada monitor adalah nilai beban retak maksimal dan perpindahan (*displacement*) dari spesimen uji. Data yang diperoleh kemudian dikalkulasikan dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) dan selanjutnya ditabulasikan ke dalam Tabel 3.

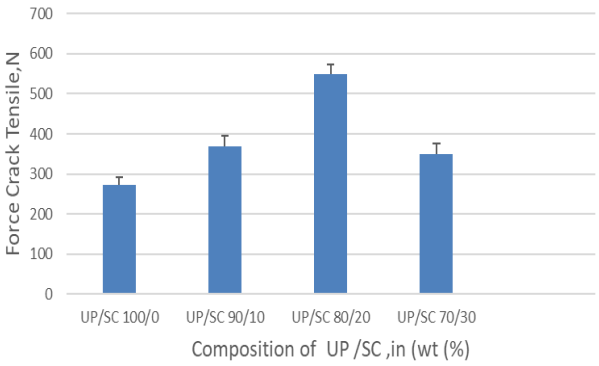
Gambar 7 menampilkan grafik *force crack tensile* terhadap persentase campuran UP/SC. Hasil ini pada dasarnya menunjukkan beban *toughness* yang mampu ditahan sampel uji retak dimana untuk UP murni (100%) tanpa SC bernilai rata-rata 221 N, 90% UP dan 10% SC bernilai rata-rata 373,7 N, 0%

 https://doi.org/10.25077/inomet.1.1.67-73.2024

UP dan 20% SC bernilai rata-rata 488,3 N, dan 70% UP dan 30% SC bernilai rata-rata 379 N.

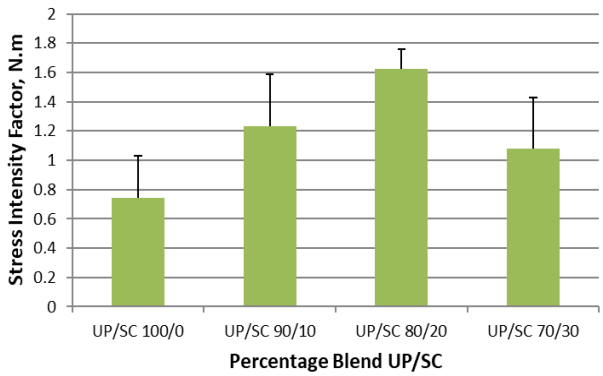
Tabel 3. Data nilai beban retak maksimum dan faktor intensitas tegangan spesimen komposit

| UP/SC (%) | Spes. | P (N) | $K_{1C}$ (MPa.m$^{0.5}$) | 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 | |




Gambar 7. Grafik *force crack tensile* terhadap persentase campuran UP/SC

Harga beban *toughness* ini meningkat dari material UP murni yang hanya sebesar 221 N dimana dengan pencampuran 10% SC harganya menjadi sebesar 373,7 N. Harga beban *toughness* tetap meningkat saat pencampuran 20% SC yaitu menjadi sebesar 488,3 N. Namun, harga ini menurun saat penambahan 30% SC yaitu menjadi sebesar 379 N. Hal ini menunjukkan bahwa ikatan UP pada SC telah jenuh sehingga menurunkan ketangguhan material komposit.




Gambar 8. Grafik faktor intensitas tegangan terhadap persentase campuran UP/SC

Gambar 8 menunjukkan peningkatan harga faktor intensitas tegangan ($K_{1c}$) material UP murni yang hanya sebesar 0,746 MPa/m$^{0.5}$ menjadi sebesar 1,230 MPa/m$^{0.5}$ saat dicampur 10% SC. Harga faktor intensitas tegangan tetap meningkat saat pencampuran 20% SC yaitu menjadi sebesar 1,624 MPa/m$^{0.5}$. Namun, harga ini menurun saat penambahan 30% SC yaitu menjadi sebesar 1,077 MPa/m$^{0.5}$. Hal ini menunjukkan bahwa ikatan UP pada SC telah jenuh sehingga menurunkan ketangguhan material komposit.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran 80% UP dan 20% SC memiliki rata-rata nilai faktor intensitas tegangan kritis ($K_{1c}$) maksimal yaitu sebesar 1,624 MPa/m$^{0,5}$. Dari data hasil pengujian menunjukkan bahwa ketangguhan retak tertinggi diperoleh pada campuran 80% UP dan 20% SC dimana pada campuran tersebut polimer polyester dapat berikatan baik dengan serat tebu sehingga ikatan matriks dengan penguat dapat membentuk material komposit dapat berikatan dengan baik. Tetapi setelah campuran polimer polyester dengan serat tebu yang ditambahkan diats 20% tidak semua material berikatan dengan ini dibuktikan dengan mulainya terjadi penurunan nilai faktor intensitas tegangan kritis ($K_{1c}$) material komposit.

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini melaporkan komposisi material komposit dari campuran poliester tak jenuh (UP) dengan serat ampas tebu (SC) pada beberapa variasi

persentase. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan ketangguhan dan ketahanan retak bahan UP murni dengan perlakuan penambahan campuran SC. Komposisi material komposit campuran 80% UP dan 20% SC memiliki nilai beban *toughness* dan nilai faktor intensitas tegangan ($K_{1c}$) maksimal sebesar 488,3 N dan 1,624 MPa/m$^{0.5}$.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas yang telah membiayai penelitian ini melalui Dana Hibah Penelitian Departemen Teknik Mesin Tahun 2023.

## DAFTAR PUSTAKA

[1] N. 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 17, no. 23, pp. 1990–1996, 2022.

[5] N. 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.

[6] N. Nusyirwan and R. Pratama, "Study on Increasing the Cracking Resistance of Unsaturated Polyester," vol. 7, no. 2, pp. 84–89, 2023.

[7] N. Nusyirwan, Y. Hizhar and A. Malik, "Study of improved crack toughness of unsaturated polymers with rice husk fiber and sago flour as strengthening materials," Jurnal Polimesin, vol. 21, no. 5, pp. 27–32, 2023.

[8] N. Adnan, H. Abral, D. H, and E. Satria, "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.

[9] 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.

[10] N. Nusyirwan and A. Malik, "Study of the Crack Resistance of Unsaturated Polyester Composite Reinforced by Finely Ground Sugarcane Bagasse Fiber as an Environmentally Friendly Composite for Lightweight Construction," pp. 1–7, 2010.

[11] 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.

[12] N. Nusyirwan and S. Ilham, "Study of Improving Fracture Toughness of Un-Saturated Polyester with Addition of Mixing Percentage of CPO Oils," vol. 2, pp. 132–137, 2022.

[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] 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.engfracmech.2020.106949.

[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] E. Satria, N. Nusyirwan, and M. Irfan, "Penghitungan Beban Kritis pada Struktur Kolom Kontinu dengan Dua Bentangan akibat Pembebanan Secara Aksial," *Met. J. Sist. Mek. dan Termal*, vol. 2, no. 2, p. 7, 2018, doi: 10.25077/metal.2.2.7-13.2018.

[19] N. Nusyirwan, "Metode Pengering Gabah Aliran Massa Kontinu Sebagai Pengering Alternatif Pada Musim Penghujan Dengan Sumber Energi Dari Cahaya Lampu Mono Kromatis," *Met. J. Sist. Mek. dan Termal*, vol. 2, no. 1, p. 47, 2018, doi: 10.25077/metal.2.1.47-55.2018.

[20] A Standard, "Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 99, no. Reapproved, pp. 1–9, 1996, doi: 10.1520/D5045-99R07E01.2.

[21] 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.

[22] 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.

[23] H. Abral, R. Fajrul, M. Mahardika, "Improving impact, tensile and thermal properties of thermoset unsaturated polyester via mixing with methyl merhacrylate and thermoset vinyl ester," 2019.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] ASTM International, "(ASTM D 5054) - Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials," *ASTM B. Stand.*, vol. 99, no. Reapproved 2007, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1520/D5045-14.priate.

## NOMENKLATUR

| | | |
|---|---|---|
| $K_{1c}$ | faktor intensitas tegangan | [MPa.m$^{1/2}$] |
| P | beban | [kN] |
| B | tebal spesimen | [cm] |
| W | lebar spesimen | [cm] |
| a | panjang retakan awal | [cm] |
| f | fungsi | - |
| %wt | persentase berat sampel | - |