



Metode Peningkatan Ketahanan Retak Resin Polyester Terhadap Penambahan Serat Sekam Padi

Yul Hizhar^{1*}, Nusyirwan²

^{1,2}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

*yul_hizhar@eng.unand.ac.id

Abstract

Polymer materials have been widely developed as alternative materials to replace metal materials due to various advantages such as having low density and an easy manufacturing process. Still, polymers have many disadvantages, including not having high mechanical strength, easy to crack when hit by impact. One of the materials studied is an unsaturated polyester polymer widely used for composite matrices in vehicle structural components, aircraft and ship bodies, and vehicle components. One of the studied fibers is rice husk particle fiber. The study of cracks is essential because it causes the material to no longer be able to support the load according to the previous plan and causes failure to occur more quickly. One way to overcome material failure due to cracks in the composite material is to prevent crack propagation by adding reinforcing material. In this study, a composite material was made using rice husk fiber to increase the crack resistance of the polyester composite matrix. From the results of crack testing, there is a tendency to increase the percentage of rice husks by 5%, 10%, 15%, and 20%. The value expected to be obtained for determining the crack resistance of the material is the value of the stress intensity factor (K_I). The most significant K_I value was obtained at a 15% rice husk percentage variable of $1,558 \text{ MPa.m}^{0.5}$. This price could increase the value of the pure polyester stress intensity factor K_I by $0.667 \text{ MPa.m}^{0.5}$, indicating an increase of 233.58%.

Keywords: crack resistance, polyester resin, rice husk fiber, tensile intensity, composites

Abstrak

Material polimer telah banyak dikembangkan sebagai material alternatif untuk pengganti material logam karena memiliki berbagai kelebihan seperti mempunyai massa jenis yang rendah, proses manufaktur yang mudah, tetapi polimer mempunyai banyak kekurangan diantaranya tidak mempunyai kekuatan mekanik yang tinggi, mudah mengalami keretakan apabila terbentur atau terkena benturan. Salah satu material yang dikaji adalah polimer *polyester* tak jenuh yang banyak digunakan untuk matriks komposit pada komponen struktur kendaraan, pesawat dan bodi kapal dan komponen kendaraan. Kajian terhadap keretakan merupakan kajian yang penting, karena menyebabkan material tidak mampu lagi mendukung beban sesuai dengan perencanaan sebelumnya karena menyebabkan kegagalan lebih cepat terjadi. Untuk dapat mengatasi kegagalan material akibat terjadinya keretakan pada material komposit salah satunya adalah dengan menghalangi perambatan retak dengan menambahkan material penguat. Penelitian ini membuat material komposit dengan menggunakan serat sekam padi untuk peningkatan ketahanan retak matriks komposit polyester. Dari hasil pengujian retak diperoleh kecenderungan peningkatan variabel penambahan persentase sekam padi 5%, 10%, 15% dan 20%. Nilai yang diharapkan diperoleh untuk penentu ketahanan retak material adalah harga faktor intensitas tegangan (K_I). Harga K_I terbesar diperoleh pada variabel persentase sekam padi 15% sebesar $1,558 \text{ MPa.m}^{0.5}$, harga tersebut dapat meningkatkan harga faktor intensitas tegangan (K_I) polyester murni sebesar $0,667 \text{ MPa.m}^{0.5}$, menunjukkan harga peningkatan sebesar 233,58%.

Kata kunci: ketahanan retak, resin polyester, serat sekam padi, intensitas tegangan, komposit

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi di bidang material polimer salah satu tujuannya adalah untuk mencari material alternatif untuk pengganti material logam untuk keperluan komponen konstruksi kendaraan, kapal dan pesawat terbang [1,2]. Hal ini dilakukan karena material logam mempunyai berat jenis yang tinggi sehingga membutuhkan energi penggerak yang besar

bila digunakan untuk keperluan tersebut [3,4]. Salah satu material yang dipilih adalah polimer, karena polimer mempunyai berat jenis yang rendah. Tetapi tidak semua komponen konstruksi bisa digantikan oleh polimer [2,5,6]. Permasalahan yang terjadi adalah polimer mempunyai banyak kekurangan diantaranya kekuatan mekanik yang rendah, mudah retak dan tidak tahan temperatur tinggi [4,7]. Salah

satu polimer yang banyak dipakai sebagai matriks dalam komposit adalah *polyester* dan *vinyl ester* [5,8], tetapi *polyester* mempunyai harga yang relatif murah dibanding *vinyl ester*. Usaha untuk meningkatkan kekuatan mekanik polimer telah banyak dilakukan diantaranya memberi penguat dengan serat sintetis atau serat alam [4,9,11]. Material ini mempunyai sifat mekanik yang baik bila digabungkan dengan serat sebagai penguat untuk membentuk material komposit [3, 12].

Metode lain untuk memperkuat polimer adalah menggabungkan dua buah polimer yang mempunyai sifat yang hampir mirip, misalnya mencampurkan *polyester* dengan *vinyl ester* [9,13,14]. Dalam penerapannya material komposit masih banyak mempunyai sifat kelemahan diantaranya tidak tahan terhadap benturan yang akan mengakibatkan keretakan yang memicu utama terjadinya kegagalan [15,16]. Salah satu yang dikaji pada penelitian ini adalah bagaimana meningkatkan ketahanan retak polimer *polyester* tak jenuh terhadap berbagai campuran penguat serat sekam padi (SP) yang ditambahkan. Penelitian sebelumnya telah membahas peningkatan sifat mekanik *polyester* terhadap beban tarik, beban impact dan beban lentur [3,8,9]. Tetapi belum ada informasi yang membahas peningkatan ketahanan retak dari polimer *polyester* tak jenuh ini terhadap penguat dari serat sekam padi terhadap ketahanan retak komposit dengan matriks *polyester* tak jenuh [11,17,18]. Maka penelitian ini akan ditujukan untuk peningkatan ketahanan retak material *polyester* dengan memberi penguatan dengan partikel serat sekam padi pada variasi persentase campuran tertentu [9,14].

2. Metode Penelitian

2.1 Material

Pada penelitian ini dilakukan penguatan ketahanan retak polimer *polyester* dengan penguat partikel sekam padi untuk mendapat material komposit yang mempunyai sifat ketahanan retak yang baik dari polimer *polyester* dengan penambahan penguat [6,9,17]. Beberapa jenis material yang dicampurkan adalah sebagai berikut:

1. Polyester

Polyester merupakan polimer yang umum digunakan sebagai matriks untuk membentuk material komposit bila dicampur dengan partikel serat sekam padi untuk meningkatkan sifat ketahanan retak yang diharapkan. Sifat mekanik yang dimiliki oleh *polyester* tergolong baik dan material yang murah [4,5]. Berikut beberapa sifat dari *polyester* antara lain: *polyester* memiliki kekuatan tarik yang cukup baik, resistensi terhadap regangan, bahan kimia dan lumut, memiliki ketahanan abrasi yang sangat baik, perawatan yang mudah, memiliki sifat anti air dan cepat kering. Jenis *polyester* yang digunakan pada penelitian ini adalah

unsaturated polyester (polyester tak jenuh). Tabel 1 menunjukkan sifat-sifat mekanik *polyester*.

Table 1. Sifat mekanik *polyester* [9]

Item	Satuan	Nilai
Tensile strength	MPa	20-100
Tensile modulus	GPa	2,1-4,1
Ultimate strain	%	1-6
Poisson's ratio	-	-
Density	g/cm ³	1,0-1,45
T _g	°C	100-140
CTE	10 ⁻⁶ /°C	55-100
Cure Shrinkage	%	5-12

2. Sekam Padi

Sekam padi adalah bagian terluar dari butir padi yang merupakan hasil sampingan dari penggilingan padi seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Sekam padi

Salah satu tujuan penelitian ini adalah pemanfaatan sekam padi untuk meningkatkan kekuatan ketahanan retak material komposit *polyester*. Komposisi kimia sekam padi terdiri dari silika (SiO₂) aktif dengan kadar cukup tinggi, yakni 94-96% (dari abu sekam), CaO, MgO, Al₂O₃ dan NaO₂ [9, 10]. Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia sekam padi yang dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber bahan baku untuk material berbasis silika. Selain jumlahnya melimpah, faktor penunjang lainnya adalah kemudahan silika untuk diekstraksi dengan sederhana dan biaya relatif murah yaitu dengan cara ekstraksi alkalis ataupun pengabuan [9, 10].

Table 2. Komposisi sekam padi [9, 10]

Komponen	Persentase Kandungan (%)
Kadar air	9,02
Protein kasar	3,03
Lemak	1,18
Serat kasar	35,68
Abu	17,71

3. Methyl Methacrylate (MMA)

Methyl methacrylate atau sering disebut dengan MMA merupakan bahan polimer yang memiliki sifat *biocompatible*, di mana menjadikan MMA sebagai bahan penelitian dalam studi literatur material biomedis [19]. Molekul MMA mempengaruhi jarak antar ikatan pada ikatan *polyester*, sehingga kekakuan dari struktur jaringan *polyester* berkurang [7]. MMA merupakan material polimer tidak berwarna dan memiliki harga yang relatif murah [5] Keuntungan penambahan MMA terhadap suatu paduan adalah menghasilkan material yang bersifat *non-toxicity*, biaya yang relatif lebih rendah, kemudahan dalam proses, kompatibilitas, dan dapat digunakan untuk pengolahan material yang memiliki resistansi *fracture* yang besar [20]. Pencampuran MMA terhadap *thermosetting resins* dapat menurunkan viskositas dari polimer *blend* [21]. Penambahan MMA di sini diharapkan dapat membuat struktur jaringan dari *polyester* menjadi homogen. Pada penelitian sebelumnya diperoleh peningkatan harga impak pada penambahan 10% MMA [3].

4. Katalis Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKP)

Fungsi katalis MEKP adalah sebagai katalisator untuk mempercepat laju pengeringan pada *polyester*. Penggunaan katalis adalah sebesar 4% terhadap paduan *polyester* [3].

Pada penelitian ini dilakukan pengujian retak material komposit *polyester* yang diberi penguat dengan serat sekam padi dengan memberi alur takikan dan retak awal. Material uji akan dilakukan pembebanan tarik vertikal pada kedua sisi yang dinaikkan secara bertahap hingga tercapai beban maksimum yang mampu ditahan oleh material sampai mengalami retak total atau ketangguhan retak material maksimal, sesuai dengan Standar ASTM D5405 [22].

Besarnya distribusi tegangan yang terjadi pada ujung retak untuk material yang diberikan cacat awal disebut dengan faktor intensitas tegangan. Besarnya faktor intensitas tegangan suatu material dengan dimensi tertentu terhadap beban yang diberikan sampai material mengalami retak total disebut faktor intensitas tegangan kritis, istilah ini dikenal dengan *fracture toughness* dilambangkan dengan (K_{IC}).

Pada penelitian ini material komposit dibuat dari matriks *polyester* dengan penguat partikel sekam padi dengan variasi perbandingan; 100%:0%, 95%:5%, 90%:10%, 85%:15% dan 80%:20% [9]. Variasi penambahan sekam padi sebesar 5% akan mengisi celah serat komposit sehingga dapat meningkatkan kemampuan mendistribusikan beban [9]. Masing-masing campuran kemudian dibandingkan *fracture toughness*-nya. Langkah-langkah pembuatan spesimen komposit *polyester* partikel sekam padi adalah sebagai berikut:

- 1) Campurkan *polyester* dan sekam padi dengan perbandingan 100% dan 0%.
- 2) Tambahkan larutan MMA dan MEKP ke dalam campuran *polyester* dan sekam padi masing-masing sebanyak 10% dan 4%. Larutan MMA berfungsi untuk mendukung struktur jaringan *polyester* menjadi homogen sementara larutan MEKP berfungsi sebagai katalis yang membantu meningkatkan laju pengeringan pada *polyester*.
- 3) Larutkan dengan menggunakan *hot plate magnetic stirrer* dengan putaran 600 rpm, temperatur 60°C, dan waktu selama 90 menit.
- 4) Dinginkan paduan selama 60 menit.
- 5) Larutkan kembali dengan menggunakan *hot plate magnetic stirrer* selama 3 menit.
- 6) Masukkan ke dalam cetakan spesimen uji retak.
- 7) Lakukan pengeringan di udara terbuka (temperatur kamar) selama 24 jam.
- 8) Ulangi langkah (1) pembuatan komposit *polyester* dan sekam padi dengan variasi perbandingan komposisi 95%:5%, 90%:10%, 85%:15% dan 80%:20%.

2.2. Prosedur pengujian

Pengujian dilakukan dengan melakukan pembebanan tarik vertikal dua sisi dengan kecepatan penarikan yang digunakan 4 mm/menit, karena kecepatan tersebut merupakan kecepatan standar untuk penelitian retak sesuai penelitian sebelumnya. Jika kecepatan penarikan melebihi kecepatan 4 mm/menit maka akan menimbulkan resiko efek dinamis.

1. *Hot plate magnetic stirrer* digunakan sebagai pengaduk campuran matriks dan penguat dengan temperatur yang bisa diatur sesuai dengan keinginan agar material komposit terbentuk dengan baik (Gambar 2). Spesifikasi dari *hot plate magnetic stirrer* antara lain; merek: Daihan Scientific, model: MS-H280-Pro, temperatur kerja: 25– 280°C, putaran: 0 – 1500 rpm.



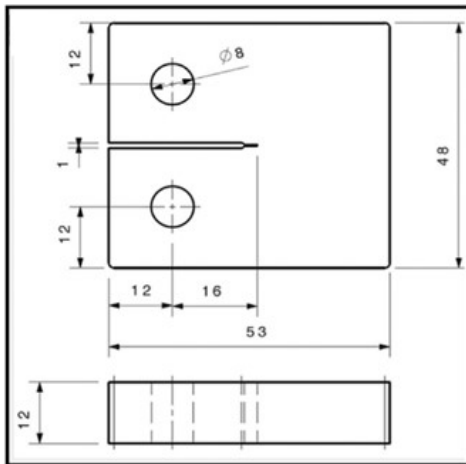
Gambar 2. Hot plate magnetic stirrer

2. Alat uji retak (Gambar 3) digunakan untuk pengujian retak sampel komposit. Dimensi sampel spesimen dibuat sesuai dengan standar spesimen yang diacu yaitu ASTM D5405 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4. Data-data spesifikasi material dapat

diinputkan pada alat ini untuk keperluan analisis sifat kekuatan retak sampel material komposit. Spesifikasi dari mesin uji retak adalah sebagai berikut; merek: COM-TEN testing machine 95T Series 5K, kapasitas: 5000 pound, monitor display: sistem layar sentuh.



Gambar 3. Mesin uji retak COM-TEN 95T series 5 K



Gambar 4. Dimensi spesimen uji sesuai standar ASTM D5405

Setelah dilakukannya proses pengujian retak material komposit, selanjutnya hasil pengukuran dimasukkan ke dalam persamaan (1) dan (2) berikut:

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

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0,8886 + 4,64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

Dengan K_{Ic} adalah faktor intensitas tegangan ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$), P adalah beban maksimum (kN), B adalah ketebalan spesimen (cm), W adalah lebar spesimen (cm), a adalah panjang retakan (cm).

3. Hasil dan Pembahasan

Pekerjaan utama dalam penelitian ini adalah menghasilkan campuran komposit *polyester* (UP) dengan partikel sekam padi (SP) dan penguat struktur MMA serta katalis MKEP ditunjukkan pada Tabel 3. Campuran sampel awal adalah *polyester* 100% tanpa ada penambahan sekam padi. Sementara, campuran berikutnya diberi penambahan variasi sekam padi sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20%.

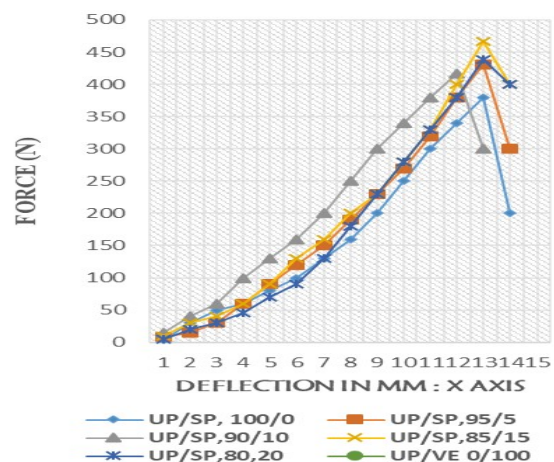
Tabel 3. Komposisi campuran komposit

Sampel	UP (wt %)	SP (wt %)	MMA (wt %)	MEKP (wt %)
1	100	0	10	4
2	95	5	10	4
3	90	10	10	4
4	85	15	10	4
5	80	20	10	4



Gambar 5. Hasil cetakan material komposit *polyester*

Campuran komposit kemudian dicetak dan dikeringkan selama 3 hari untuk menghasilkan spesimen uji yang transparan, padat, keras, kaku seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 6. Kurva beban vs defleksi

Gambar 6 menunjukkan bahwa besarnya beban pada deformasi dengan kecepatan gerak gaya pada sampel adalah 5 mm/menit. Semua sampel mengalami perambatan retak yang berbeda tergantung dari persentase campurannya. Sebelum beban maksimum, kurva defleksi cenderung meningkat secara linear akibat gaya pembebanan.

Tabel 4. Beban retak maksimum yang mampu ditahan komposit dengan sekam padi

Material (perbandingan komposisi %)	Beban retak (N)	
UP/SP, 100/0	379	± 30.136
UP/SP, 95/5	431	± 45.036
UP/SP, 90/10	417	± 46.136
UP/SP, 85/15	466	± 57.603
UP/SP, 80/20	438	± 35.219

Pada Tabel 4 dapat diketahui bahwa *polyester* murni menghasilkan kekuatan tarik yang cukup tinggi. Pada kondisi ini deformasi yang terbentuk sangat sedikit. Hal ini sesuai dengan jaringan struktur kimia *polyester* yang saling berikatan silang sehingga memiliki sedikit gerakan dan sangat kaku. Penambahan persentase sekam padi dalam *polyester* mempengaruhi deformasi plastis dan kekuatan tarik dalam campuran komposit. Beban retak maksimum terjadi ketika komposisi *polyester* sebesar 85% dengan sekam padi sebesar 15%. Variasi penambahan sekam padi sebesar 20% dengan *polyester* 80% tidak mampu lagi meningkatkan kekuatan retak komposit. Peningkatan kekuatan retak disebabkan oleh adanya ikatan rantai molekul sekam padi (SP) dengan rantai molekul *polyester*. Sehingga rantai molekul *polyester* tidak akan berikatan secara penuh antara sesamanya. Dengan kata lain, ikatan rantai molekul *polyester* yang kaku akan sedikit terganggu oleh ikatan rantai molekul sekam padi yang ditambahkan. Penurunan beban retak pada spesimen komposit dengan kandungan sekam padi 20% disebabkan karena tingkat kejenuhan ikatan partikel sekam padi dengan matriks *polyester*.

Tabel 5. Harga faktor intensitas tegangan kritis dari campuran *polyester* dengan sekam padi

Material (perbandingan komposisi %)	Intensitas tegangan (MPa.m ^{0.5})
UP/SP,100/0	0,667 ± 0,036
UP/SP, 95/5	1,227 ± 0,089
UP/SP,90/10	1,260 ± 0,173
UP/SP,85/15	1,558 ± 0,242
UP/SP,80/20	1,270 ± 0,224

Tabel 5 menunjukkan faktor intensitas tegangan (K_{Ic}) dari polimer campuran SP pada polimer *polyester* (UP). Penambahan 15% SP dan 10% MMA pada

komposisi material telah menghasilkan nilai tertinggi untuk K_{Ic} , dengan nilai 1,558 MPa.m^{0.5}.

4. Kesimpulan

Penelitian ini melaporkan keberhasilan penentuan komposisi yang tepat dari campuran polimer yang terbuat dari matriks *polyester* tak jenuh dengan menambahkan partikel serat sekam padi dan MMA untuk meningkatkan kerapuhan polimer *polyester* tak jenuh menjadi tangguh. campuran yang dibuat dari matriks *polyester* tak jenuh dengan menambahkan partikel serat sekam padi ester dan MMA 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 komponen kendaraan, badan kapal wisata, kapal nelayan sangat membantu. Campuran *polyester* tak jenuh dengan 15% SP dan 10% MMA 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 SP dan MMA pada bahan dasar *polyester* tak jenuh murni. Peningkatan ketangguhan patah K_{Ic} dari 0,667 MPa.m^{0.5} untuk *polyester* murni meningkat menjadi $K_{Ic} = 1,558$ MPa.m^{0.5}.

Daftar Rujukan

- [1] Hiremath, N., Young, S., Ghossein, H., Penumadu, D., Vaidya, U., and Theodore, M., 2020. *Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications. Composites Part B: Engineering*, 198.
- [2] Davallo, M., Pasdar, H., and Mohseni, M., 2010. Mechanical properties of unsaturated polyester resin. *International Journal of Chemical Technology Research*, 2 (4), pp. 2113–2117.
- [3] Abrial, H., Fajrul, R., and Mahardika, M., 2019. *Improving impact, tensile and thermal properties of thermoset unsaturated polyester via mixing with thermoset vinyl ester and methyl methacrylate. Polymer Testing*, 81.
- [4] Frómeta, D., Parareda, S., Lara, A., Molas, A., Casellas, D., Jonsen, P., and Calvo, J., 2020. *Identification of fracture toughness parameters to understand the fracture resistance of advanced high strength sheet steels. Engineering Fracture Mechanics*, 229.
- [5] Adnan, N., Abrial, H., Dahlan, H., and Satria, E., 2022. *Identification of Mechanical Strength for Mixture of Thermoset Polyester with Thermoset Vinyl Ester due to Bending Load. JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur)*, 6 (1), pp. 19–25.
- [6] Adnand, N., Mutya, R., Ridwan, F., Abrial, H., Dahlan, H., and Satria, E., 2021. Pengaruh Variasi Persentase Campuran Polymer Polyester dan Vinyl Ester Terhadap Kekuatan Tegangan Lentur. *Metal: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal*, 5 (2), pp. 126-131.
- [7] Naik, P. K., Londe, N. V., Yogesha, B., Naik, L. L., and Pradeep, K. V., 2018. *Mode I Fracture Characterization of Banana Fibre Reinforced Polymer Composite. IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 376

- (1).
Materials Science Engineering, 1062 (1).
- [8] Ardhyananta, H., Puspadewa, F. D., Wicaksono, S. T., Widyastuti, Wibisono, A. T., Kurniawan, B. A., Ismail, H., and Salsac, A. V. , 2017. *Mechanical and Thermal Properties of Unsaturated Polyester/Vinyl Ester Blends Cured at Room Temperature. IOP Conference Series Materials Science Engineering*, 202 (1).
- [9] Nusyirwan, Abrial, H., Hakim, M., and Vadia, R., 2019. *The potential of rising husk fiber/native sago starch reinforced biocomposite to automotive component. IOP Conference Series Materials Science Engineering*, 602 (1).
- [10] Agung, G. F., Sy, M. R. H., and Mardina, P., 2013. Ekstraksi silika dari abu sekam padi dengan pelarut KOH. *Konversi*, 2 (1), pp. 28-31.
- [11] Seyhan, A. T., Tanoğlu, M., and Schulte, K., 2009. *Tensile mechanical behavior and fracture toughness of MWCNT and DWCNT modified vinyl-ester/polyester hybrid nanocomposites produced by 3-roll milling. Materials Science Engineering: A*, 523, (1–2), pp. 85–92.
- [12] Yang, Z., Peng, H., Wang, W., and Liu, T., 2010. *Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. Journal of Applied Polymer Sciences*, 116 (5), pp. 2658–2667.
- [13] Budiman, A. dan Sugiman, S., 2016. Karakteristik Sifat Mekanik Komposit Serat Bambu Resin Polyester Tak Jenuh Dengan Filler Partikel Sekam. *Dinamika Teknik Mesin*, 6 (1), pp. 76–82.
- [14] Abrial, H., Fajrul, R., Mahardika, M., Handayani, D., Sugiarti, E., Muslimin, A. N., and Rosanti, S. D., 2021. *Nanovoids in fracture surface of unsaturated polyester/vinyl ester blends resulting from disruption of the cross-linking of the polymer chain networks. IOP Conference Series Materials Science Engineering*, 1062 (1).
- [15] Jeyanthi, S. and Rani, J. J., 2012. *Improving mechanical properties by KENAF natural long fiber reinforced composite for automotive structures. Journal of Applied Science Engineering*, 15 (3), pp. 275–280.
- [16] Meng, Q. and Wang, T., 2019. *An improved crack-bridging model for rigid particle-polymer composites. Engineering Fracture Mechanics*, 211, pp. 291–302.
- [17] Dhakal, H. N. and Ismail, S. O., 2019. *Unsaturated polyester resins: Blends, interpenetrating polymer networks, composites, and nanocomposites. Unsaturated Polyester Resins*, pp. 181-198.
- [18] Liu, K., He, S., Qian, Y., An, Q., Stein, A., and Macosko, C. W., 2019. *Nanoparticles in Glass Fiber-Reinforced Polyester Composites: Comparing Toughening Effects of Modified Graphene Oxide and Core-Shell Rubber. Polymer Composites*, 40 (S2), pp. E1512–E1524.
- [19] Nusyirwan, 2015. Metode Pengereng Gabah Aliran Massa Kontinu Dengan Wadah Pengereng Horizontal dan Pengaduk Putar. *Mechanical*, 6 (2), pp. 82–88.
- [20] Ali, N. A. B. U. and Karim, K. J. B. A., 2015. *A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA). Polymer Review*, 55 (4), pp. 678–705.
- [21] Kalia, S. and Vashistha, S., 2012. *Surface Modification of Sisal Fibers 9 (Agave Sisalana) Using Bacterial Cellulase and Methyl Methacrylate. Journal of Polymers and the Environment*, 20 (1), pp. 142–151.
- [22] ASTM, 1996. *Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials. Annual Book of ASTM Standards*, 99, pp. 1–9.