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

INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal

| ISSN (Online) 3025-2598 |

Artikel Penelitian

Peningkatan Kekuatan Ketahanan Retak Polimer Poliester Tak Jenuh dengan Penambahan Minyak Nabati

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

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

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:
Diterima Redaksi: 09 Desember 2024
Revisi Akhir: 23 Desember 2024
Diterbitkan *Online*: 30 Desember 2024

KATA KUNCI

Poliester tak jenuh

Minyak nabati

Campuran

Beban retak

Energi fraktur

KORESPONDENSI

E-mail:

yul_hizhar@eng.unand.ac.id

A B S T R A C T

Polymer materials are being developed to replace metals due to their low density and ease of manufacturing, but unsaturated polyester (UP) has weaknesses, such as easy cracking and poor biodegradability. UP is used in composite matrices for vehicle, aircraft, and ship structures. This study mixed UP with vegetable oil to improve its crack resistance, which bonds with the polyester molecular chain to reduce stiffness. Results showed that the fracture force of the UP-vegetable oil mixture was higher than pure UP (0.35 kN). The best fracture resistance occurred with a 70% UP and 30% vegetable oil mixture, showing a fracture force of 0.49 kN. However, increasing vegetable oil content above 40% decreased fracture strength due to molecular saturation. The fracture energy results followed similar trends.

1. PENDAHULUAN

Poliester tak jenuh (*unsaturated polyester*/UP) adalah material polimer yang banyak digunakan dalam bidang rekayasa, mebel dan cinderamata. Penggunaan yang lebih luas dari poliester sebagai material pengganti logam merambah pada bidang transportasi seperti untuk pembuatan badan kendaraan, kapal dan pesawat terbang [1, 2, 3]. Alasannya adalah polimer mempunyai berat jenis yang rendah, mudah dibentuk dan dapat dimodifikasi dengan melakukan pencampuran dengan material lain untuk membentuk material komposit [4, 5]. Kelebihan dari material komposit adalah kekuatan mekaniknya dapat melebihi kekuatan polimer asalnya, sesuai dengan unsur penguatnya [6, 1, 5, 7]. Polimer ini mudah dibentuk dan dicetak dimana wujud awalnya yang berbentuk cairan dituang kedalam suatu cetakan lalu diberi pengeras untuk pembekuannya. Material ini juga bisa digunakan sebagai penutup atau *epoxy* untuk pembuatan mebel seperti meja dan perabot lainnya. Materialnya punya dasar warna alami dan bisa dipoles untuk menghasilkan warna yang mengkilat sehingga bisa dijadikan perhiasan dan cinderamata.

https://doi.org/10.25077/inomet.2.2.8-13.2024
Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

Kekuatan mekanik polimer poliester cukup baik dan bisa diperkuat dengan menambahkan penguat dari serat dan partikel lainnya yang cocok dengan poliester ini. Tetapi disamping beberapa kelebihannya itu, polimer juga mempunyai beberapa kelemahan, seperti kekuatan tarik yang rendah, mudah retak, dan tidak tahan temperatur tinggi [8, 9, 10]. Sifat mekanik dari poliester dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat mekanik poliester [6]

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

Usaha memperkuat polimer dengan serat alam telah banyak dilakukan misal dengan serat karbon, serat nilon, serat rami, dan serat lainnya [11, 1, 12]. UP adalah polimer yang dihasilkan dari proses pemecahan rantai karbon dan hidrogen minyak bumi. UP termasuk polimer *thermosetting* dari bahan sintetis yang mempunyai struktur molekul ikatan silang yang rapat dan berhubungan dekat satu sama lainnya, serta bersifat getas [13, 14, 15, 16]. Kekuatan tegangan tarik material poliester mudah ditingkatkan tetapi sebaliknya ketangguhannya sulit ditingkatkan karena material ini mudah retak bila mengalami benturan. Hal ini disebabkan karena rantai polimer ini memiliki rantai polimer yang saling terhubung dengan ikatan silang dan saling mengikat satu sama lainnya sehingga bersifat kaku dan getas. Beberapa studi menunjukkan usaha untuk mencegah keterikatan rantai polimer yang berdekatan adalah dengan menambahkan material lain yang dapat berikatan dengan rantai poliester ini, misalnya menambahkan *polymer vinyl ester* untuk membuat sedikit ada deformasi pada material poliester sehingga kekakuannya berkurang [17, 6]. Penambahan *vinyl ester* mengubah bentuk kurva tegangan tariknya yang berbentuk garis lurus menjadi sedikit ada daerah plastisnya. *Vinyl ester* adalah polimer yang berasal dari minyak bumi dan mempunyai harga yang mahal dan tidak ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan membuat polimer poliester lebih tangguh dengan penambahan minyak goreng atau minyak nabati. Minyak nabati dipilih karena material poliester dan minyak nabati sama-sama memiliki ikatan rantai OH yang hampir sama dan diharapkan dapat berikatan dengan baik. Untuk itu perlu dilakukan usaha untuk meningkatkan sifat getas material tersebut agar mampu menahan beban retak dalam rentang beban tertentu. Pada penelitian ini dilakukan pengujian kemampuan ketahanan retak dari material UP dengan penambahan minyak nabati.

2. METODOLOGI

2.1. Material

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian untuk menentukan ketahanan retak material komposit dari pencampuran UP terhadap penambahan campuran minyak nabati (MN). UP yang digunakan dalam penelitian ini adalah produk Yukalac 1560 BL-EX. MN yang digunakan adalah minyak kelapa sawit. Standar pengujian retak dan dimensi sampel uji mengacu ke standar uji retak ASTM D5405.

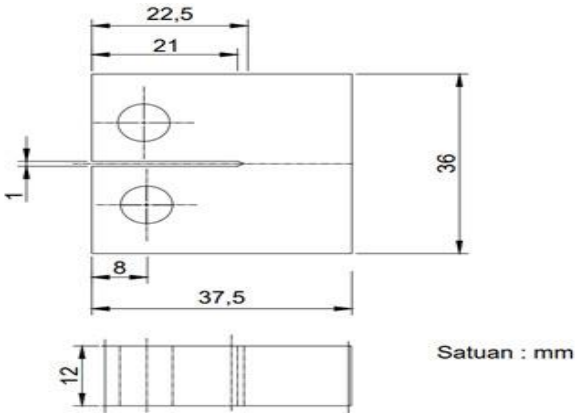
Methyl methacrylate disingkat dengan MMA merupakan bahan polimer yang memiliki sifat *biocompatible*, di mana menjadikan MMA sebagai bahan penelitian dalam studi literatur material biomedis. Molekul MMA yang tergabung dalam rantai ikatan mengarah pada jarak antar ikatan pada ikatan poliester, sehingga kekakuan dari struktur jaringan poliester berkurang. MMA merupakan material polimer tidak berwarna dan memiliki biaya yang relatif murah. Keuntungan penambahan MMA terhadap suatu paduan adalah menghasilkan material yang bersifat *non-toxicity*, biaya yang relatif lebih rendah, kemudahan dalam proses, kompabilitas, dan dapat digunakan untuk pengolahan material yang memiliki resistansi *fracture* yang besar. Pencampuran MMA terhadap *thermosetting resins* dapat menurunkan viskositas dari polimer *blend*. Penambahan MMA di sini diharapkan biasa membuat struktur jaringan dari poliester menjadi homogen. Pada penelitian sebelumnya, didapatkan peningkatan harga impak pada penambahan 10% MMA.

Fungsi katalis adalah sebagai katalisator untuk mempercepat laju pengeringan pada poliester.

Katalis yang digunakan adalah katalis Mepoxe produksi PT. Justus Kimiaraya yaitu sebesar 4% terhadap paduan poliester.

2.2. Prosedur Pengujian

Pada pengujian retak material poliester yang dicampur dengan MN, spesimen terlebih dahulu diberi alur takikan dan retak awal. Material uji akan diberi pembebanan tarik vertikal pada kedua sisi atas dan bawah yang dinaikkan secara bertahap hingga tercapai beban maksimum yang mampu ditahan oleh material sampai mengalami retak total atau yang dikenal ketangguhan retak material maksimal (*fracture toughness*). Standar pengujian retak dan dimensi sampel uji mengacu ke standar uji retak dengan berdasarkan ASTM D5405 (Gambar 1).



Gambar 1. Dimensi spesimen uji sesuai standar ASTM D5045

Besar 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* yang dilambangkan dengan (K_{1C}).

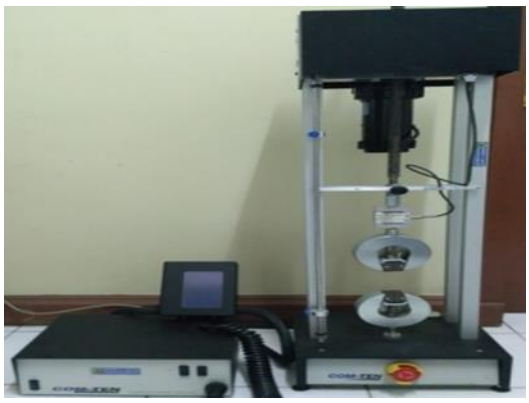
Pengujian retak merupakan pengujian material dengan cara memberikan penarikan pada material, agar beban yang diberikan akan menyebabkan terjadinya *initial crack* terhadap spesimen. *Initial crack* yang dihasilkan akan menyebabkan retakan yang menjalar pada spesimen hingga material tidak dapat menahan pembebanan yang diberikan [18]. Panjangnya retakan yang didapatkan dari alat ukur yang terbaca pada layar akan dihitung dengan pada persamaan matematis pada persamaan (2)[19][18].

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



Gambar 2. *Hot plate magnetic stirrer*

Mesin uji retak digunakan untuk pengujian retak sampel komposit (Gambar 3). Pada alat ini dinputkan data–data sfesifikasi material yang diperlukan 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, *load cell model*: TSB0050, dengan monitor display sistem layar sentuh.



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

 https://doi.org/10.25077/inomet.2.2.8-13.2024

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

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

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

Dengan K_{1c} adalah faktor intensitas tegangan (MPa.m $^{0.5}$), P adalah beban maksimum (kN), B adalah ketebalan spesimen (cm), W adalah lebar spesimen (cm), dan a adalah panjang retakan (cm).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan perpaduan material komposit *unsaturated polyester* (UP*)* dengan minyak nabati (MN) dan penguat struktur *Methyl Methacrylate* (MMA) seperti yang terlihat pada Tabel 2. Sampel awal merupakan campuran UP 100% tanpa ada penambahan MN. Sementara, campuran berikutnya diberi penambahan variasi minyak nabati sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40%.

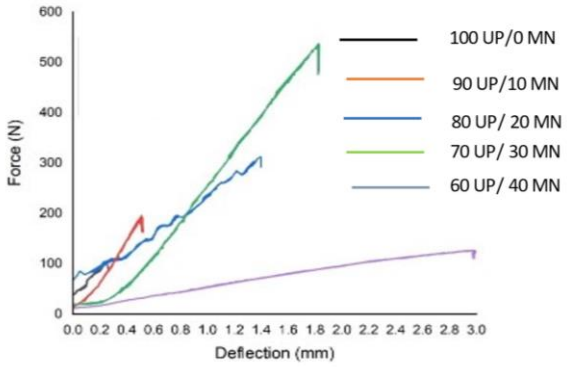
Tabel 2. Komposisi campuran spesimen uji

Sampel	UP (% wt)	MN (% wt)	MMA (% wt)
1	100	0	10
2	90	10	10
3	80	20	10
4	70	30	10
5	60	40	10



Gambar 4. **S**pesimen uji yang telah dicetak dan dikeringkan

Tahap selanjutnya, campuran komposit dicetak dan dikeringkan selama 3 hari. Spesimen uji yang dihasilkan berbentuk transparan, padat, keras, dan kaku seperti yang ditunjukan pada Gambar 4.



Gambar 5. Kurva beban vs defleksi pada uji retak

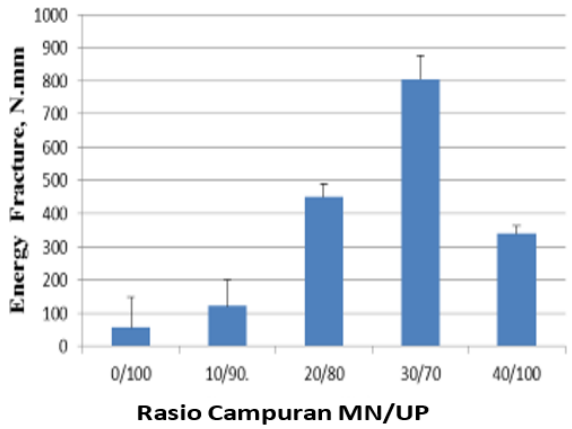
Gambar 5 merupakan hasil pengamatan pada mesin uji retak yang menunjukan pembebanan terhadap deformasi dengan kecepatan gerak gaya pada sampel sebesar 5 mm/menit. Persentase campuran mempengaruhi perambatan retak masing-masing spesimen. Sebelum beban maksimum, kurva defleksi cenderung meningkat secara linear akibat gaya pembebanan.

Hasil pengujian menunjukan besarnya gaya retakan masing-masing campuran UP dan MN lebih besar dari gaya retakan UP murni tanpa campuran rata-rata hanya 0,35 kN. Sedangkan, gaya retakan maksimal terjadi pada campuran UP sebanyak 70% sedangkan MN sebanyak 30% yaitu rata-rata 0,49 kN. Ini menunjukan penambahan persentase MN pada material UP dapat meningkatkan ketahanan retak material. Sementara, menaikkan kandungan MN diatas 40% akan menurunkan harga kekuatan retak campuran. Hal ini terjadi karena adanya kejenuhan molekul MN pada UP sehingga ikatan antar molekulnya berkurang.

Tabel 3 menunjukkan faktor intensitas tegangan kritis (K_{1c}) yang dihitung dengan persamaan (1) dan (2) untuk masing-masing spesimen uji campuran material UP dan MN. Hasil perhitungan menunjukkan harga K_{1c} maksimal diperoleh pada kandungan 70% UP dan 30% MN yaitu sebesar 15,787 MPa.m$^{0.5}$.

Tabel 3. Hasil pengujian spesimen uji retak

MN/ UP (%)	Spesi-men	Beban retak (kN)	K 1c	K 1c rata-rata (MPa.mm$^{0.5}$)
	1	0,62	1,990	
0/100	2	0,34	1,083	2,03
	3	0,101	2,966	
	1	0,226	7,387	
10/90	2	0,194	6,628	6,620
	3	0,193	5,845	
	1	0,312	9,654	
20/80	2	0,325	10,463	9,866
	3	0,301	9,483	
	1	0,486	16,015	
30/70	2	0,440	13,820	15,787
	3	0,530	17,528	
	1	0,120	3,904	
40/60	2	0,138	4,672	4,201
	3	0,126	4,029	



Gambar 6. Energi fraktur pada setiap rasio campuran MN/UP

Selanjutnya besarnya energi retakan (*energy fracture*) pada masing-masing spesimen uji retak dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil pengujian menunjukan besarnya energi fraktur masing-masing campuran UP dan MN lebih besar dari energi fraktur UP murni tanpa campuran yang rata-rata berharga 0,57 N.mm. Harga energi fraktur maksimal terjadi pada campuran UP 70% dan MN 30% dengan nilai rata-rata 796 N.mm. Ini menunjukkan penambahan persentase MN pada UP dapat meningkatkan energi fraktur material. Sedangkan menaikkan kandungan MN diatas 40% menyebabkan penurunan harga energi fraktur. Sama seperti pengamatan hasil kekuatan retak material, kecenderungan ini terjadi karena adanya kejenuhan molekul MN pada UP sehingga ikatan antar molekulnya berkurang.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukan bahwa besarnya gaya retakan masing-masing campuran UP dan MN lebih tinggi dari gaya retakan UP murni tanpa campuran. Harga rata-rata gaya retakan maksimal terjadi pada campuran UP 70% dan MN 30% yaitu 0,49 kN, sedangkan gaya retakan UP murni hanya sebesar 0,35 kN. Ini menunjukan penambahan persentase MN pada material UP dapat meningkatkan ketahanan retak material. Sementara, usaha menaikan kandungan MN diatas 40% menyebabkan harga kekuatan retak material menurun karena terjadinya kejenuhan ikatan molekul MN pada UP. Hasil penelitian variasi pencampuran UP dan MN ini juga menunjukan kecenderungan pengaruh hasil yang sama pada besarnya energi fraktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas yang telah mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] 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.

[2] Z. Othman, M. P. Saiman, M. F. A. Hamid, and M. N. Talibin, "The application of 2D woven kenaf reinforced unsaturated polyester composite in automotive interiors," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 368, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/368/1/012032.

[3] 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.

[4] M. T. Islam *et al.*, "Effect of Coconut Shell

Powder as Filler on the Mechanical Properties of Coir-polyester Composites," *Chem. Mater. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 75–82, 2017, doi: 10.13189/cme.2017.050401.

[5] A. Balaji, R. Purushothaman, R. Udhayasankar, S. Vijayaraj, and B. Karthikeyan, "Study on Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Banana Fiber-Reinforced Epoxy Composites," *J. Bio- Tribo-Corrosion*, vol. 6, no. 2, 2020, doi: 10.1007/s40735-020-00357-8.

[6] 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.

[7] H. Oliver-Ortega, F. Julian, F. X. Espinach, Q. Tarrés, M. Ardanuy, and P. Mutjé, "Research on the use of lignocellulosic fibers reinforced bio-polyamide 11 with composites for automotive parts: Car door handle case study," *J. Clean. Prod.*, vol. 226, pp. 64–73, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.047.

[8] H. Tuo, Z. Lu, X. Ma, J. Xing, and C. Zhang, "Damage and failure mechanism of thin composite laminates under low-velocity impact and compression-after-impact loading conditions," *Compos. Part B Eng.*, vol. 163, no. August 2018, pp. 642–654, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.01.006.

[9] L. Prasad, V. Singh, R. V. Patel, A. Yadav, V. Kumar, and J. Winczek, "Physical and Mechanical Properties of Rambans (Agave) Fiber Reinforced with Polyester Composite Materials," *J. Nat. Fibers*, 2021, doi: 10.1080/15440478.2021.1904481.

[10] T. Gobikannan *et al.*, "Flexural properties and failure mechanisms of infusible thermoplastic- and thermosetting based composite materials for marine applications," *Compos. Struct.*, vol. 273, p. 114276, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114276.

[11] S. Wahono, A. Irwan, E. Syafri, and M. Asrofi, "Preparation and characterization of Ramie Cellulose Nanofibers/CaCO3 Unsaturated Polyester Resin composites," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 746–751, 2018.

[12] 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.

[13] 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.

[14] M. Mandhakini, S. Devaraju, M. R. Venkatesan, and M. Alagar, "Linseed vinyl ester fatty amide toughened unsaturated polyester- bismaleimide composites," *High Perform. Polym.*, vol. 24, no. 3, pp. 237–244, 2012, doi: 10.1177/0954008311436263.

[15] P. Hari Sankar, Y. V. Mohana Reddy, and K. Hemachandra Reddy, "Polyester/vinylester polymer hybrid blended nanocomposites: Effect of nano on mechanical and thermal properties," *Fibers Polym.*, vol. 16, no. 2, pp. 443–448, 2015, doi: 10.1007/s12221-015-0443-9.

[16] 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.

[17] Y. Hizhar and A. Malik, "Jurnal Polimesin strengthening materials," vol. 21, no. 5, pp. 27–32, 2023.

[18] 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.

[19] M. Hughes, C. A. S. Hill, and J. R. B. Hague, "The fracture toughness of bast fibre reinforced polyester composites: Part 1 Evaluation and analysis," *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 21, pp. 4669–4676, 2002, doi: 10.1023/A:1020621020862.