

Studi Pembuatan Material Komposit Tahan Lentur Dari Serat Ampas Tebu Yang Digiling Halus untuk Komponen Automotif

Nusyirwan Nusyirwan^{1*}, Rahmad Hidayat²

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

*Email: nusyirwan1802@gmail.com

ABSTRACT

Composite material is one of the materials widely used in the field of construction engineering as a candidate for replacing metal materials. The advantages of this material include its low mass, ease of shape, and moisture resistance. However, this material still has many disadvantages, including low bending stress and easy to crack. Utilisation of waste materials such as bagasse which is worthless is one of the things that is very valuable, in this study we use it to be utilized as a high-value composite material to be used as the main material for making composite polymer materials in the field of engineering such as vehicles and ship hulls. In this study, we studied the flexural strength of composite materials from finely ground sugarcane fibre. From the test results, it is known that the flexural strength of the test material shows an increase in the variable of adding finely ground sugarcane fibre, the flexural strength increases from 10% to 20%, and after 20% the flexural stress value tends to decrease. The maximum flexural stress value was obtained with a mixture of finely ground sugarcane fibre with a percentage of 20% with a flexural stress value of 102.32 MPa, this value can increase the maximum flexural stress value of pure polyester by 42.52 MPa, showing an increase of 249.63%.

Keywords: Replacing metal materials, flexural strength, finely ground sugarcane fibre

PENDAHULUAN

Pendahuluan Perkembangan teknologi material semakin pesat, salah satunya adalah upaya untuk menemukan material yang kuat dan ringan untuk menggantikan logam. Material komposit merupakan salah satu jenis material yang banyak dikembangkan dan diteliti saat ini. Material tersebut merupakan material yang ringan dan mudah dibentuk sehingga kekuatannya masih dapat ditingkatkan. Bahan utama untuk pembuatan material komposit adalah polyester tak jenuh yang merupakan polimer yang berasal dari turunan minyak bumi yang banyak digunakan sebagai matrik dasar untuk membentuk material komposit yang akan digabung dengan serat alam [1]. Sifat polimer ini adalah tahan korosi, relative ringan dibandingkan logam, dan memiliki nilai estetika tinggi menjadi salah satu alasan material polimer dikembangkan sebagai alternative dalam dunia industri. Material komposit memiliki potensi untuk meningkatkan sifat mekanik dan termalnya [2].

Sifat mekanik komposit pada umumnya dapat ditingkatkan dari bahan komposit adalah kekuatan, kekakuan, dan keuletan. Alasan peningkatan sifat mekanik bahan polimer sebagai matrik untuk material komposit adalah karena bahan polimer umumnya getas. Peningkatan sifat mekanik bahan polimer dapat dilakukan dengan mencampur beberapa polimer. Pencampuran polimer ini dikenal sebagai campuran polimer [3], [4]. Pembuatan komposit dengan merk resin Polyester (UP) grade Reversol P9509. Serat ampas tebu dipotong dan diayak dengan ukuran diameter rata-rata 1,18 mm dan 600 μm dan direndam dalam larutan NaOH konsentrasi masing-masing 1, 3 dan 5% pada suhu kamar selama 1 jam, kemudian serat dikeringkan dalam oven selama 72 jam pada suhu 70°C hingga diperoleh tegangan lentur maksimum sebesar 38,5 Mpa [13]. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan penelitian untuk meningkatkan sifat kuat Tarik komposit dengan material *unsaturated polyester* yang berfungsi sebagai matrik dan penambahan material serat ampas tebu sebagai penguat dengan berbagai tingkat variasi persentase campuran. Pada penelitian sebelumnya belum ada informasi yang dilaporkan mengenai penelitian tentang kuat lentur komposit polyester yang diperkuat dengan serat ampas tebu. Penelitian yang paling banyak dilakukan adalah tentang kuat tarik dan kuat impak komposit [10], [13]. Seiring dengan semakin pesatnya perkembangan komposit dari serat alam lainnya, serat ampas tebu telah banyak digunakan untuk aplikasi teknik, termasuk komponen otomotif dan bilah kincir angin. Tujuan dari pencampuran polimer adalah untuk memperoleh sifat mekanik dari masing-masing polimer yang

dicampur sehingga diperoleh material paduan polimer baru dengan sifat mekanik yang lebih baik. Salah satu polimer yang sering digunakan dalam dunia industri adalah poliester. Poliester umumnya digunakan oleh dunia industry dalam pembuatan suatu produk material karena polyester memiliki fleksibilitas dan kemudahan dalam proses pembentukan suatu struktur [5]. Polyester mempunyai sifat mekanik yang terbatas dibandingkan dengan beberapa jenis polimer lainnya, sehingga diperlukan paduan lain yang dapat memperkuat dan meningkatkan sifat mekaniknya [6]. Selain poliester, jenis polimer lain yang juga umum digunakan adalah vinil ester. Vinil ester memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada polimer lain tetapi harganya jauh lebih mahal dari pada poliester [7]. Peningkatan sifat mekanik campuran polimer akan berkaitan dengan persentase paduan penelitian terdahulu mengenai informasi nilai kuat retak campuran polimer dari paduan poliester dan vinil ester telah dilakukan [8], [9]. Dari beberapa penelitian terdahulu tentang pemanfaatan serat tebu untuk material komposit, belum ada informasi mengenai perlakuan dimensi serat tebu untuk meneliti hubungan antara panjang serat, arah orientasi serat dan kerapatan serat terhadap kuat tarik dan kuat lentur komposit serat tebu. Untuk dapat memanfaatkan nilai tambah dari komposit serat tebu, muncul ide untuk meneliti material komposit yang memiliki kuat lentur tinggi dengan cara memperkecil ukuran serat menjadi dimensi yang lebih kecil sehingga komposit tersebut memiliki rasio kerapatan matrik terhadap serat yang lebih tinggi. Untuk itu pada penelitian ini serat ampas tebu dihancurkan dengan cara di grinding hingga ukuran serat menjadi 100 mesh sehingga material komposit tersebut memiliki tingkat keseragaman dimensi dan kerapatan serat yang tinggi sehingga dihasilkan material komposit yang memiliki kuat lentur tinggi dan tidak mudah putus serta dapat menahan berbagai perubahan temperature pembebanan.

Penelitian ini menggunakan material *unsaturated* polyester (UP) sebagai matrik pembuatan material komposit karena material polyester memiliki kekuatan mekanik yang baik dan dapat mengikat serat dengan baik serta karena memiliki sifat adhesif yang baik [10], [11]. Penelitian ini menggunakan material *unsaturated* polyester (UP) sebagai matrik pembuatan material komposit karena material polyester memiliki kekuatan mekanik yang baik dan dapat mengikat serat dengan baik serta memiliki sifat adhesif yang baik. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah diperoleh material komposit yang kuat dengan sifat yang tahan terhadap berbagai variasi beban lentur serta memiliki kapasitas penyerapan energi yang lebih tinggi dari material komposit ini. Metode penelitian ini adalah dengan mengevaluasi kekuatan lentur komposit dengan matrik *unsaturated* polyester (UP) dengan penguat serat tebu (SC) yang digiling halus dengan perbandingan persentase serat terhadap matrik tertentu dan pengujian mengacu pada Standar ASTM D 790 – 792.

METODE PENELITIAN

Polyester tak jenuh merupakan polimer yang umum digunakan sebagai bahan pembuatan material komposit karena material ini banyak digunakan sebagai matrik dengan menambahkan penguat dari bahan serat [12], [13]. Aplikasi material komposit dengan matrik polyester banyak di aplikasikan dalam bidang teknik, terutama pada kendaraan, kapal, dan pesawat terbang. Sifat mekanik yang dimiliki polyester cukup baik dan material ini murah [12], [14].

Berikut ini adalah beberapa material yang digunakan pada penelitian; antara lain: polyester memiliki kekuatan tarik yang cukup baik, tahan terhadap peregangan, bahan kimia dan jamur, memiliki ketahanan abrasi yang sangat baik, perawatan mudah, tahan lembab dan cepat kering. Jenis poliester yang digunakan dalam penelitian ini adalah polyester tak jenuh (UP) dengan produk Yukalac 1560 BL-EX [2] & [12]. Katalis yang digunakan adalah katalis Mepoxe produksi PT. Justus Kimia raya. Fungsi katalis tersebut adalah sebagai katalisator untuk mempercepat laju pengeringan poliester. Penggunaan katalis sebesar 4% untuk dipadukan dengan polyester [3]. Untuk memperoleh material komposit, diperlukan material serat sebagai penguat yang dipilih dari serat ampas tebu (SC) yang dihancurkan. Serat ampas tebu dipilih karena mengandung sedikit lignin terikat sehingga tidak memerlukan banyak bahan pembersih NaOH [16], [17]. Selanjutnya bahan tambahan yang digunakan adalah metil metakrilat (MMA) yang fungsinya untuk menurunkan viskositas polyester sehingga mudah tercampur dengan serat ampas tebu dengan sempurna.

Pada Gambar 1, dapat ditunjukkan proses penghalusan serat ampas tebu dengan proses berikut ini. Untuk membuat material komposit yang cukup kuat menahan beban lentur, serat ampas tebu kasar (*coarse sugarcane bagasse fibre*) dipisahkan dari kulit dan gabus (*foam*) diambil seratnya saja. Langkah selanjutnya serat terpilih akan kemudian serat yang sudah dipotong sepanjang 3 mm, lalu digiling menggunakan mesin penggiling (*grinding machine*). Hasil gilingan, akan disaring dengan menggunakan media penyaring (*fiber screen*), sehingga diperoleh dimensi yang seragam dengan ukuran partikel 100 mesh dan berat jenis $0,97 \text{ gram/cm}^3$. Serat ampas tebu yang telah dihancurkan setelah di saring (*crushed sugarcane bagasse fibre*) memiliki ukuran partikel yang memiliki tingkat keseragaman yang cukup tinggi yang dan memiliki ukuran partikel yang hampir rata [16]. Agar dapat mengikat dengan baik maka dilakukan proses alkalisasi pada proses ini serat ampa stebu yang telah di hancurkan di rendam dan diendapkan dengan NaOH 4% selama 8 jam pada suhu ruang. Dengan demikian diharapkan kekuatan ikatan antara material matrik dengan material serat dapat terikat dengan baik dan merata sehingga dapat meningkatkan sifat ketahanan lentur dari material komposit. Proses selanjutnya akan dibuat menjadi material komposit [18], [19].



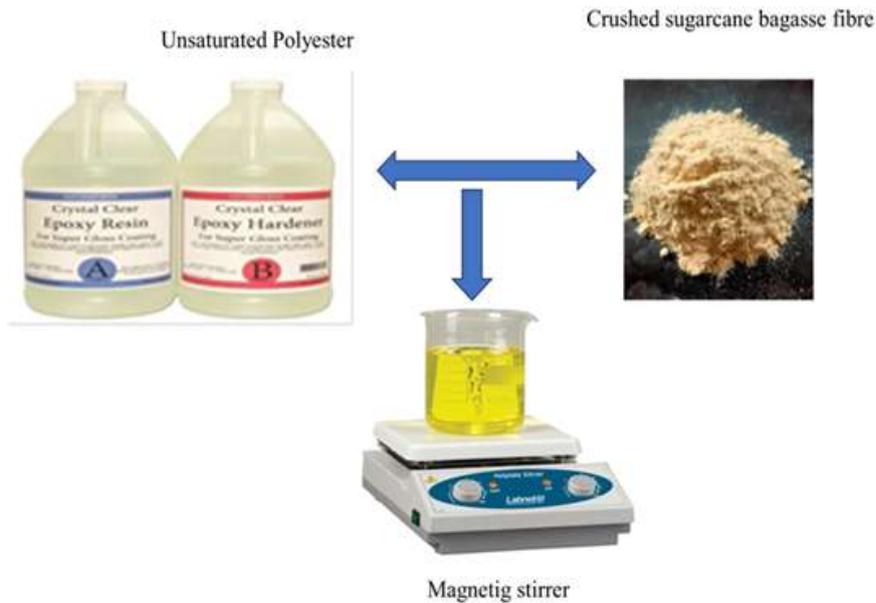
Gambar 1. Proses penghalusan serat ampas tebu

Untuk proses selanjutnya adalah pembuatan proses pembuatan material komposit yaitu serat ampas tebu yang telah digiling halus (*crushed sugarcane bagasse fibre*) tersebut setelah dilakukan proses alkalisasi dengan diendapkan dengan NaOH 4% selama 8 jam sebelumnya dan akan dicampur secara merata dengan polyester tak jenuh (*unsaturated polyester*).

Untuk melakukan penelitian dalam pembuatan material komposit, dilakukan perencanaan komposisi campuran dari polyester tak jenuh dan serat ampas tebu (SC) yang dihancurkan dicampur dengan komposisi yang tepat dan sesuai dengan komposisi perencanaan pada Tabel 1. Pada Gambar 2, dilakukan proses selanjutnya yaitu ke dua material diaduk sampai tingkat keseragaman yang merata selama 30 menit dengan alat pengaduk (*magnetic stirrer*) dengan spesifikasi sebagai berikut Spesifikasi pengaduk magnetic pelat panas adalah sebagai berikut; Spesifikasi pengaduk magnetic pelat panas adalah sebagai berikut; *Spesifikasi Daihan Scientific Trade*, model MS-H280-Pro, Suhu Kerja $25 \text{ }^\circ\text{C} - 280 \text{ }^\circ\text{C}$, kecepatan putaran $0 - 1500 \text{ rpm}$.

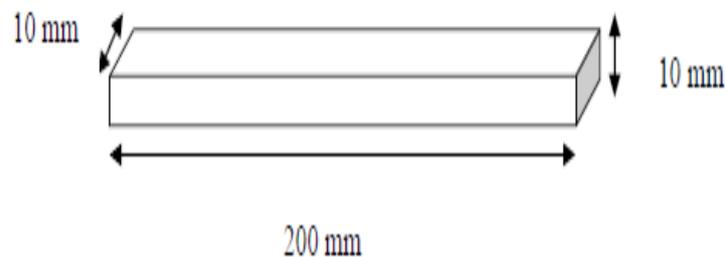
Tabel 1. Perencanaan komposisi campuran material polyester tak jenuh dan serat ampas tebu halus

Material No	Komposisi polyester (wt %)	Serat ampas tebu halus. (wt %)
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30



Gambar 2. Proses pembuatan material komposit

Untuk melakukan pengujian material uji harus dicetak sesuai dengan standar material untuk uji lentur dengan standar ASTM D 790 - 792, dengan dimensi yang telah ditentukan yaitu panjang 200 mm, lebar 10 mm, dan tebal x 10 mm, yang ditunjukkan pada Gambar 3, sesuai dengan standar [12],[25-26].



Gambar 3. Dimensi standar spesimen uji lentur menurut Standar ASTM D 790 - 792

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode hand-layup, yaitu proses pembuatan dengan cara menuang polyester tak jenuh dengan tangan kedalam cetakan yang berisi serat, kemudian ditekan sambil dihaluskan dengan roller atau kuas. Cetakan dibuat dari material akrilik dengan dimensi mengacu pada dimensi yang tertera pada standar ASTM D 790 -792, bentuk cetakan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Bentuk cetakan spesimen uji lentur menurut Standar ASTM D 790 - 792.

Proses penekanan material yang telah dituang ke cetakan ini, dilakukan berulang-ulang hingga ketebalan yang diinginkan tercapai. Proses Untuk membentuk material komposit, diperlukan dua jenis material, yaitu material matrik yang digunakan untuk mengikat material serat, dan material penguat yang berasal dari serat ampas tebu yang dihancurkan. Untuk membuat benda uji material komposit, campuran dicetak dengan cara dituang ke dalam cetakan dan dikeringkan di udara terbuka (suhu ruangan) selama 48 jam [21]. Bentuk material komposit setelah didinginkan di udara terbuka dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Material komposit hasil cetakan untuk spesimen uji lentur
Sesuai Standar ASTM D 790 - 792.

Sampel hasil cetakan akan diuji dengan alat uji lentur menggunakan mesin uji lentur merk universal GALDABINI Universal Testing Machine Seri 32559 [18],[23]. Pada penelitian ini dilakukan uji retak pada material komposit poliester yang diperkuat dengan serat ampas tebu halus dengan membuat benda uji yang lentur dan diberikan beban lentur vertical ke bawah. Material uji akan diberikan beban lentur dengan memberikan beban tekan ke bawah pada posisi di tengah arah memanjang yang dinaikkan secara bertahap hingga mencapai beban maksimum yang dapat ditahan material hingga mengalami fraktur lentur maksimum pada material tersebut. Besarnya sebaran tegangan fraktur di bagian tengah benda uji dapat dicatat oleh mesin pembengkok yang melakukan uji lentur [24], [33]. Penampilan mesin uji lentur dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Mesin uji lentur merk GALDABINI seri 32559.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui sifat kuat lentur material komposit, dilakukan uji sampel untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menahan beban lentur hingga material berbentuk beban vertical dengan material ditopang pada kedua ujungnya dan beban tekan pada arah tengah hingga material mengalami tekukan dan patah. Pembahasan dapat dilakukan dalam beberapa bahasan berikut ini.

Hasil pengujian untuk setiap benda uji lentur dapat ditampilkan pada mesin uji lentur untuk setiap benda uji lentur dan nilai beban yang terekam dapat ditampilkan hingga material mengalami fraktur lentur. Hasil uji lentur diolah menggunakan persamaan berikut ini pengolahan data hasil uji lentur, dimensi standar digunakan mengikuti Gambar 4 dan dihitung menggunakan Persamaan (1), Persamaan (2) juga dapat ditulis dengan hubungan berikut:

$$\sigma = E \cdot \epsilon(2)$$

Dimana harga kuantitas ϵ dapat diturunkan dari hubungan yang ditulis pada persamaan(3)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}(3)$$

T Jumlah energi yang disediakan oleh mesin uji lentur yang akan diserap oleh material uji diberikan oleh persamaan berikut;

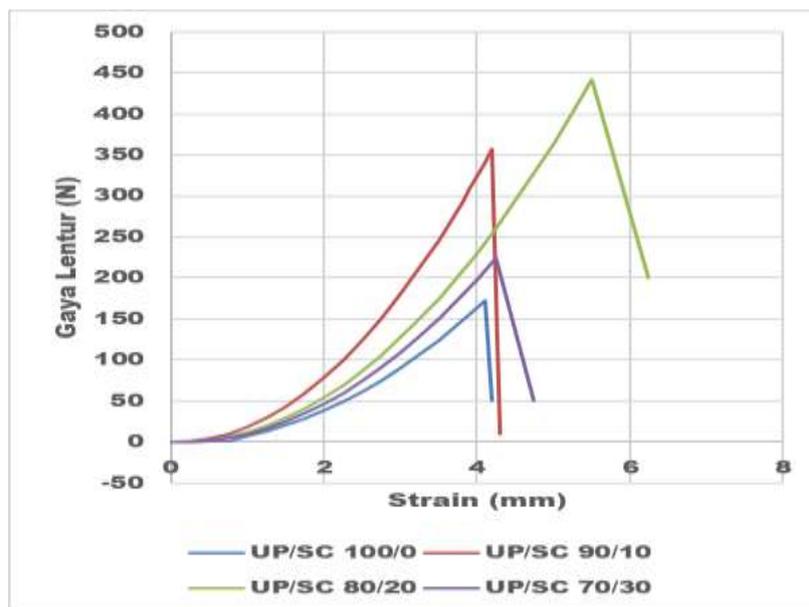
$$W = \int_0^u P \cdot dl(4)$$

Setelah mengalami beban lentur yang diberikan oleh mesin uji lentur, material komposit akan mengalami deformasi hingga putus sesuai dengan bentuk sampel material seperti pada Gambar 7.



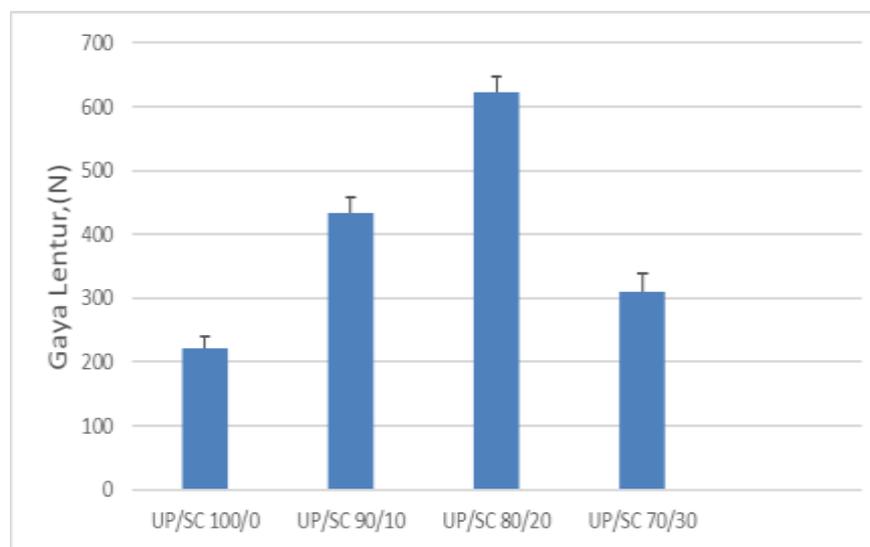
Gambar 7. Bentuk material komposit setelah pengujian lentur material komposit.

Untuk mengetahui kuat lentur material komposit pada komposisi masing-masing sampel setelah mengalami beban lentur dengan pembebanan yang diberikan oleh mesin uji lentur, maka data pengujian dari sampel uji dapat terbaca pada monitor mesin uji lentur. Selanjutnya data tersebut dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (3). Untuk mengevaluasi perubahan yang signifikan pada data hasil uji lentur yang dihasilkan gaya lentur yang diberikan mesin uji lentur, kemudian data tersebut diplot dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 8. Pada Gambar 8 terlihat bahwa besarnya gaya lentur bertambah dengan penambahan serat ampas tebu halus (SC) sebanyak 10% sampai dengan 20%, namun nilai gaya lenturnya berkurang dengan penambahan serat ampas tebu halus (SC) melebihi di atas 20%. Diduga serat ampas tebu halus (SC) di atas 20% tidak dapat berikatan dengan baik dengan material polyester. Hal ini berarti bahwa penambahan serat ampas tebu (SC) di atas 20% polimer polyester tidak dapat mengikat serat ampas tebu dengan baik, karena terjadi kejenuhan pada ikatan molekuler material komposit.



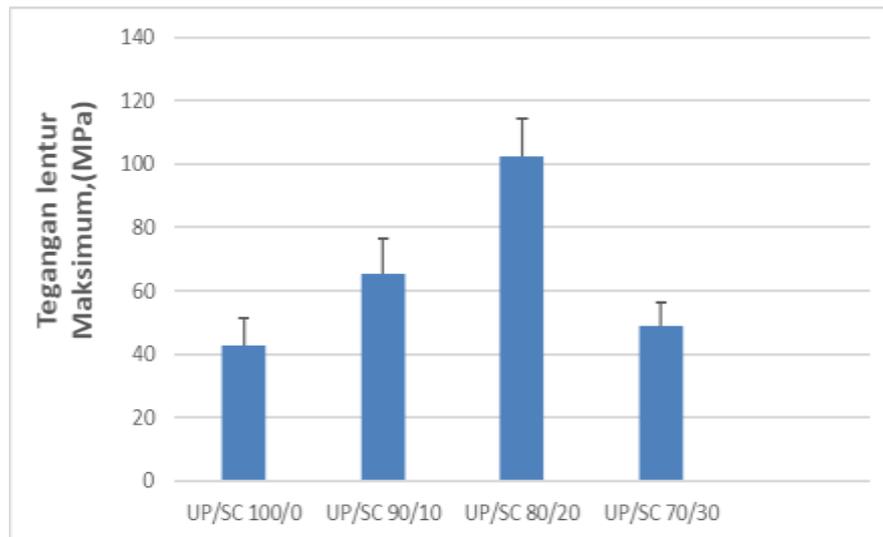
Gambar 8. Grafik hasil pengujian gaya lentur terhadap deformasi pada komposit campuran UP dan SC.

Untuk mengetahui nilai perbandingan dan nominasi data hasil uji gaya lentur maksimum yang dihasilkan dari mesin uji lentur, maka data tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk diagram batang pada Gambar 9. Nilai gaya lentur maksimum ditunjukkan pada Gambar 9. Setelah nilai beban ditampilkan pada monitor mesin uji lentur, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai gaya lentur maksimum dengan menggunakan persamaan (1). Untuk polyester murni (UP), gaya lentur maksimum yang hanya terbaca pada mesin uji lentur adalah 172,20 N, selanjutnya apabila ditambahkan serat ampas tebu sebanyak 10%, maka gaya lentur maksimum bertambah menjadi 357,42 N dan terus bertambah menjadi 442,06 N, apabila penambahan serat ampas tebu sebanyak 20%. Sebaliknya apabila penambahan serat ampas tebu yang dihancurkan ditambah menjadi 30% maka gaya lentur maksimum berkurang menjadi 224,65 N, ini berarti apabila penambahan serat ampas tebu yang dihancurkan melebihi 20% maka ikatan poliester dan serat ampas tebu yang dihancurkan tidak terikat secara sempurna dan ikatan komposit tersebut jenuh. Nilai gaya lentur maksimum bertambah dengan penambahan serat ampas tebu yang dihancurkan (SC) dari 10% menjadi 20%. Akan tetapi nilai gaya lentur maksimum berkurang dengan penambahan serat ampas tebu yang dihancurkan lebih dari 20%. Diasumsikan bahwa serat ampas tebu yang dihancurkan di atas 20% tidak dapat berikatan dengan baik pada bahan *polyester* takjenuh, karena ujung-ujung rantai molekul *polyester* melebihi batas jenuh.



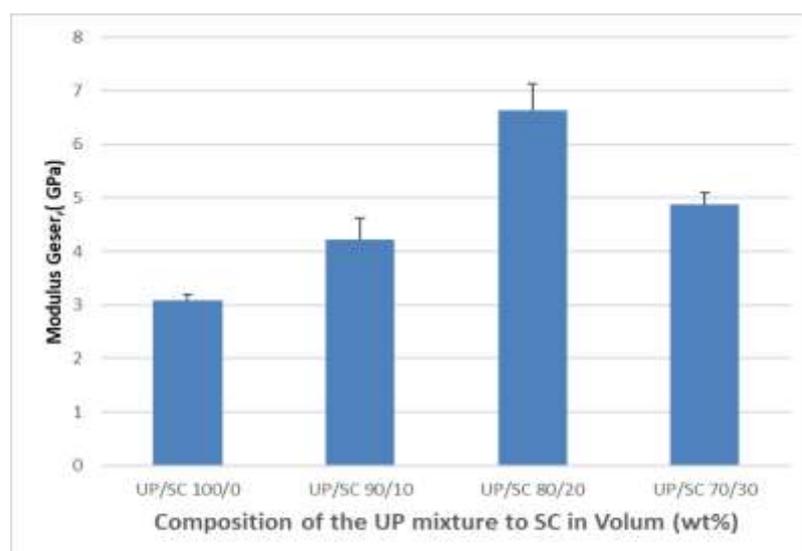
Gambar 9. Grafik gaya lentur maksimum untuk komposisi campuran UP dan SC.

Pada Gambar 10, dapat dilihat untuk polyester murni (UP), berdasarkan data yang terbaca pada mesin uji lentur yang dihitung dengan persamaan (1), tegangan lentur maksimum diperoleh sebesar 42,52 MPa, sehingga apabila serat ampas tebu halus yang ditambahkan sebanyak 10%, tegangan lentur maksimum meningkat menjadi 65,45 MPa dan terus meningkat hingga mencapai 102,32 MPa, apabila penambahan serat ampas tebu yang ditambahkan sebanyak 20%. Sebaliknya apabila penambahan serat ampas tebu yang ditambahkan sebanyak 30%, tegangan lentur maksimum menurun hingga mencapai 48,71 MPa, artinya apabila penambahan serat ampas tebu halus yang ditambahkan melebihi 20%, ikatan poliester dan serat ampas tebu yang ditambahkan tidak terikat secara sempurna dan ikatan komposit dalam keadaan jenuh. Nilai tegangan lentur maksimum meningkat dengan penambahan serat ampas tebu halus (SC) dari 10% menjadi 20%. Namun nilai tegangan lentur maksimum menurun dengan penambahan serat ampas tebu hancur lebih dari 20%. Hal ini diduga serat ampas tebu hancur di atas 20% tidak dapat berikatan dengan baik pada bahan polyester takjenuh, karena ujung-ujung rantai molekul polyester sudah melebihi batas jenuh.



Gambar 10. Grafik tegangan lentur maksimum untuk komposisi campuran UP dan SC.

Nilai modulus lentur yang ditunjukkan pada Tabel 3 selanjutnya dapat diplot menggunakan diagram batang pada Gambar 11. Setelah grafik hasil pengujian ditayangkan pada monitor alat uji lentur, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai modulus lentur menggunakan Persamaan (3) dan Persamaan (4). Untuk polyester murni (UP), modulus lentur yang hanya terbaca pada alat uji adalah 3,08 GPa, selanjutnya apabila ditambahkan ampas serat ampas tebu sebanyak 10%, modulus lenturnya meningkat menjadi 4,22 GPa. Terus meningkat hingga mencapai 6,63 GPa, apabila penambahan serat ampas tebu sebanyak 20%. Sebaliknya apabila penambahan serat ampas tebu ditambahkan hingga 30%, modulus lenturnya menurun hingga mencapai 4,87 GPa, artinya apabila penambahan serat ampas tebu melebihi 20% maka ikatan poliesternya akan terikat secara sempurna oleh serat ampas tebu dan ikatan kompositnya sudah jenuh. Nilai modulus lentur meningkat dengan penambahan serat ampas tebu hancur (SC) sebesar 10% menjadi 20%. Akan tetapi, nilai penyerapan regangan energy menurun dengan penambahan serat ampas tebu hancur lebih dari 20%. Hal ini diduga bahwa serat ampas tebu hancur diatas 20% tidak dapat berikatan dengan baik pada bahan polyester tak jenuh, karena ujung-ujung rantai molekul polyester telah melampaui batas jenuh.



Gambar 11. Grafik Modulus geser maksimum untuk komposisi campuran UP dan SC

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa besarnya gaya putus masing-masing campuran poliester (UP) dan serat ampas tebu hancur (SC) dapat meningkatkan besarnya gaya lentur polyester murni (tanpa campuran) menjadi hanya 172,20 N. Selanjutnya, penambahan serat ampas tebu hancur (SC) hingga 20% untuk meningkatkan ketahanan lentur material. Nilai gaya lentur maksimum terjadi pada campuran UP sebesar 80% sedangkan SC sebesar 20%, yaitu rata-rata sebesar 442,06 N bertambah sebesar (256,71%). Selanjutnya, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan lentur maksimum untuk masing-masing campuran poliester (UP) dan serat ampas tebu hancur (SC) dapat meningkatkan nilai tegangan lentur maksimum polyester murni (tanpa campuran) menjadi hanya maksimum $\sigma_b = 42.52 \text{ N/mm}^2$. Selanjutnya, penambahan serat ampas tebu hancur (SC) hingga 20% dapat meningkatkan nilai tegangan lentur material. Nilai tegangan lentur yang terjadi pada campuran UP sebesar 80%, sedangkan SC sebesar 20%, yaitu rata-rata $\sigma_b = 102.32 \text{ N/mm}^2$ meningkat sebesar (249,63%). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa polyester dapat berikatan baik dengan serat ampas tebu (SC) yang dihancurkan membentuk material komposit, yaitu pada kadar serat ampas tebu (SC) yang dihancurkan hingga 20% dan ikatan molekul tereduksi di atas 20%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. H. Ardhyanta *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.
- [2]. Nusyirwan, H. Abral, M. Hakim, dan 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.
- [3]. M. Mandhakini, S. Devaraju, M. R. Venkatesan, dan M. Alagar, "Linseed vinyl ester fatty amide toughened unsaturated polyester- bismaleimide composites," *High Perform. Polym.*, vol. 24, no. 3, hal. 237–244, 2012, doi: 10.1177/0954008311436263.
- [4]. A. T. Seyhan, M. Tanoğlu, dan 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, hal. 85–92, 2009, doi: 10.1016/j.msea.2009.05.035.
- [5]. Z. Yang, H. Peng, W. Wang, dan T. Liu, "Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, no. 5, hal. 2658–2667, 2010, doi: 10.1002/app.
- [6]. Q. Meng dan T. Wang, "An improved crack-bridging model for rigid particle-polymer composites," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 211, no. January, hal. 291–302, 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2019.02.028.
- [7]. H. N. Dhakal dan 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.
- [8]. M. Santiam, R. Drainage, dan W. Cascades, "The Applicability of Linear Elastic Fracture Mechanics to Compressive Damage of the Carbon Fiber Reinforced Plastic Matrix," 2019.
- [9]. A. Budiman dan S. Sugiman, "Karakteristik Sifat Mekanik Komposit Serat Bambu Resin Polyester Tak Jenuh Dengan Filler Partikel Sekam," *Din. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, hal. 76–82, 2016, doi: 10.29303/d.v6i1.28.
- [10]. H. Abral, F. Rahmat, D. Handayani, E. Sugiarti, A. N. Muslimin, dan S. D. Rosanti, "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, hal. 106193, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106193.
- [11]. 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, hal. 1–9, 1996, doi: 10.1520/D5045-99R07E01.2.
- [12]. N. Adnan, H. Abral, D. H., dan 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, hal. 19–25, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v6i1.14450.
- [13]. A. A. Betelie, Y. T. Megera, D. T. Redda, dan A. Sinclair, “Experimental investigation of fracture toughness for treated sisal epoxy composite,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 5, no. 1, hal. 93–104, 2018, doi: 10.3934/matserci.2018.1.93.
- [14]. D. Frómota *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, hal. 106949, 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.106949.
- [15]. A. D. Laksono, M. Faisyal, D. M. Kurniawati, J. Awali, G. Ramadhan, dan M. N. Rozikin, “Improved mechanical properties with the soaking time of NaOH in composites made from sugarcane bagasse fibers for future windmill blades material,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1034, no. 1, hal. 012136, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1034/1/012136.
- [16]. N. Wulandari, T. R. Muchtadi, S. Budijanto, dan Sugiyono, “Physical Properties of Crude Palm Oil and Their Correlations to the Quality Attributes,” *J. Teknol. dan Ind. Pangan*, vol. 22, no. 2, hal. 177–183, 2011.
- [17]. N. Nusyirwan, P. Abiema, dan A. Malik, “Methods Increased Fracture Toughness Thermosetting Polyester Mixture with Vi- nyl Ester for Raw Materials in Ship Bodies,” vol. 1, no. 1, hal. 43–50, 2023.
- [18]. N. Nusyirwan, M. Rani, dan R. Pratama, “Identification of the fracture surface of thermoset polyester due to bending load,” vol. 7, no. 1, hal. 51–58, 2022, doi: 10.22219/jemmmme.v7i1.23086.
- [19]. N. H. Sari *et al.*, “Morphology and mechanical properties of coconut shell powder-filled untreated cornhusk fibre-unsaturated polyester composites,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 222, no. February, hal. 123657, 2021, doi: 10.1016/j.polymer.2021.123657.
- [20]. B. Sampath, N. Naveenkumar, P. Sampathkumar, P. Silambarasan, A. Venkadesh, dan M. Sakthivel, “Experimental comparative study of banana fiber composite with glass fiber composite material using Taguchi method,” *Mater. Today Proc.*, vol. 49, no. xxxx, hal. 1475–1480, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.232.
- [21]. N. Nusyirwan dan R. Pratama, “Study on Increasing the Cracking Resistance of Unsaturated Polyester,” *Int. J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 2, hal. 84–89, 2023.
- [22]. G. F. Aynalem dan B. Sirahbizu, “Effect of Al₂O₃ on the tensile and impact strength of flax/unsaturated polyester composite with emphasis on automobile body applications,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6641029.
- [23]. M. Y. Mahmoud Zaghoul, M. M. Yousry Zaghoul, dan M. M. Yousry Zaghoul, “Developments in polyester composite materials – An in-depth review on natural fibres and nano fillers,” *Compos. Struct.*, vol. 278, no. July, hal. 114698, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114698.
- [24]. L. Natrayan *et al.*, “Water Retention Behaviour and Fracture Toughness of Coir/Pineapple Leaf Fibre with Addition of Al₂O₃ Hybrid Composites under Ambient Conditions,” *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/7209761.
- [25]. R. Arjmandi *et al.*, “Kenaf fibers reinforced unsaturated polyester composites: A review,” *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 16, 2021, doi: 10.1177/15589250211040184.