

Efek Fraksi Volume Serat dan Penyerapan Air Tawar Terhadap Kekuatan Bending Komposit Tapis Kelapa/Polyester

I Putu Lokantara, Ngakan Putu Gede Suardana & I Made Gatot Karohika

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Badung

e-mail:putu.lokantara@me.unud.ac.id

Abstrak

Fraksi volume serat serta lamanya perendaman dalam air mempengaruhi sifat mekanis dari komposit. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh fraksi volume serat pada komposit serta waktu perendaman pada air tawar terhadap kekuatan bending dari komposit Polyester-Tapis kelapa. Penelitian ini menggunakan serat tapis kelapa yang dipotong sepanjang 1 cm dengan variasi fraksi volume serat 0%,5%,7,5%, dan10%, matriks resin unsaturated polyester (UPRs) jenis Yukalac 157 BQTN-EX, dan 1% hardener jenis MEKPO. Benda uji lentur dibuat dengan teknik press hand lay-up dan dipotong sesuai dengan dimensi uji lentur sesuai ASTM D 790-03. Hasil pengujian bending menunjukkan bahwa lama perendaman dan variasi fraksi volume serat, meningkatkan kekuatan lentur komposit. Tegangan maksimum dicapai oleh komposit dengan 10% fraksi volume serat pada perendaman selama 48 jam yaitu sebesar 41.994 MPa. Sedangkan tegangan terendah dicapai oleh komposit dengan 0% fraksi volume serat yaitu sebesar 13.700 MPa. Modulus lentur yang terjadi menunjukkan peningkatan hingga waktu perendaman selama 24 jam. Modulus lentur maksimum dicapai oleh komposit dengan 10% fraksi volume serat sebesar 7.114 GPa sedangkan yang terendah dicapai oleh komposit dengan 0% fraksi volume serat sebesar 3.023GPa.

Kata Kunci : Komposit, Lama Perendaman, Fraksi Volume Serat, Kekuatan Lentur

Abstract

Effect of Fiber Volume Fraction and Water Absorption toward Bending Strength of Coconut Filters/ Polyester Composite

The variation of fibre volume and the duration of water soaking take influence on the mechanical properties of composite. This research aim is to know the influence of fraction volume fibre and soaking duration on the mineral watertoward the tensile strength and flexural of polyester-coconut-tapis composite. This research used coconut-tapis fibre which is cut 1 cm in length with 0%, 5%, 7,5%, and 10% fiber volume fraction, unsaturated-polyester (UPRs) matrix resin type Yukalac 157 BQTN-EX, and MEKPO hardener. The flexure specimen are made by press hand lay-up method and cut according ASTM D790-03 for the flexure test. The result of flexure test shows that the duration of soaking and the fiber volume fraction give a significant effect on the flexural strength of composite. The highest strength are reached by composite with 10% fibre volume on 48 hour soaking time equal to 41.994 MPa. The flexure modulus happenend shows increasing until 24 hour soaking time. The highest modulus are reached by composite with 10% fibre volume equal to 7.114 GPa while the lowest are reached by composite with 0% fibre volume equal to 3,023 GPa.

Keywords: Composite, Soaking Duration, Fibre Volume Fraction, Flexure Strength

1. Pendahuluan

Komposit berpenguat serat banyak diaplikasikan pada alat-alat yang membutuhkan material yang mempunyai perpaduan dua sifat dasar yaitu kuat namun juga ringan. Polimer dan komposit dapat digunakan untuk bumper mobil, bodi kendaraan, bodi pesawat terbang, body perahu.

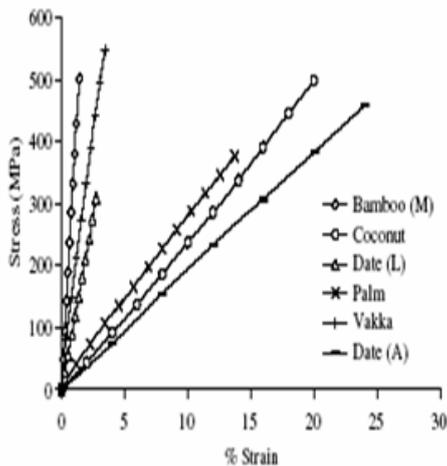
Trend perkembangan komposit dewasa ini beralih dari komposit dengan material penyusun sintetis ke komposit dengan material penyusun dari bahan alami. Baik material untuk matrik maupun serat (penguat) telah dilakukan banyak penelitian untuk mendapatkan bahan natural yang layak untuk

digunakan selanjutnya sebagai alternatif pengganti bahan-bahan sintetis penyusun komposit.

Serat alami memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan serat sintetis, seperti beratnya lebih ringan, dapat diolah secara alami dan ramah lingkungan, merupakan bahan terbaharukan, mempunyai kekuatan dan kekakuan yang relatif tinggi dan tidak menyebabkan iritasi kulit [1] Keuntungan-keuntungan lainnya adalah kualitas dapat divariasikan dan stabilitas panas yang rendah. Beberapa penelitian tentang serat alami sudah

dilakukan oleh beberapa peneliti., Sifat-sifat tarik dari beberapa serat alami [2] terlihat pada gambar 1.

Kekuatan tarik spesifik dan modulus tarik spesifik dari beberapa serat alami seperti ditunjukkan pada tabel 1. Penelitian komposit tapis kelapa-serbuk kayu diperoleh hasil bahwa panjang dan lebar dari Tapis kelapa tidak memberikan pengaruh terhadap modulus bending pada papan komposit.



Gambar 1. Grafik hubungan tegangan-regangan dari serat alami.

Tabel 1. Sifat-sifat tarik dari beberapa serat alami.

Tensile properties of various natural fibers

Name of the fiber	% Tensile strain	Average tensile strength (MPa)	Average tensile modulus (GPa)	Specific tensile strength (MPa/(kg m ⁻³))	Specific tensile modulus (MPa/(kg m ⁻³))
Vakka	3.46	549	15.85	0.6778	19.56
Date (L)	2.73	309	11.32	0.3121	11.44
Date (A)	24.00	459	1.91	0.4781	1.99
Bamboo (M)	1.40	503	35.91	0.5527	39.47
Bamboo (C)	1.73	341	19.67	0.3831	22.10
Palm	13.71	377	2.75	0.3660	2.67
Coconut	20.00	500	2.50	0.4348	2.17
Banana	3.36	600	17.85	0.4444	13.22
Sisal	5.45	567	10.40	0.3910	7.17

Komposit dengan serat batang pohon pisang yang dirajut [3] didapatkan tegangan maksimum dari serat tersebut adalah 14,14 MN/m² and modulus Young's 0.976 GN/m². Peneliti lainnya [4] telah mempelajari serat kelapa dengan pelapisan lilin pada permukaannya, didapatkan tegangan tarik yang meningkat secara linier dengan panjang serat di dalam matriks.

Penelitian komposit epoxy/tapis kelapa lembaran dengan perlakuan serat 2% KMnO₄, perbandingan epoxy : hardener 7 : 3 telah dilakukan diperoleh kekuatan tarik sebesar 70 MPa, dan komposit dengan perlakuan serat 0.5%NaOH, ratio epoxy : hardener 6 :4 sebesar 60 MPa [5]. Telah pula dilakukan penelitian kekuatan tarik, regangan dan modulus elastisitas komposit polyester/tapis kelapa yang di-chop 10 mm dengan perlakuan serat 5 % NaOH selama 2 jam, 4 jam dan 6 jam diperoleh

kekuatan tarik tertinggi 58.8 MPa dan regangan tarik tertinggi 1.3% untuk perlakuan 2 jam, sedangkan modulus elastisitas tertinggi sebesar 5.07 GPa untuk perlakuan serat 6 jam. Dengan kekuatan yang dimiliki maka serat tapis kelapa layak dipakai sebagai bahan penguat untuk komposit polimer.

Water-absorption dalam komposit merupakan kemampuan komposit dalam menyerap uap air dalam waktu tertentu. Water-absorption pada komposit merupakan salah satu masalah terutama dalam penggunaan komposit di luar ruangan [6]. Semua komposit polimer akan menyerap air jika berada di udara lembab atau ketika polimer tersebut dicelupkan di dalam air. Water-absorption pada komposit berpenguat serat alami memiliki beberapa pengaruh yang merugikan dalam propertiesnya dan mempengaruhi kemampuannya dalam jangka waktu yang lama juga penurunan secara perlahan dari ikatan interface komposit serta menurunkan sifat mekanis komposit seperti kekuatannya. Penurunan ikatan interface komposit menyebabkan penurunan properties mekanis komposit tersebut [7]. Karena itu, pengaruh dari water-absorption sangat vital untuk penggunaan komposit berpenguat serat alami di lingkungan terbuka. Daya tahan terhadap water-absorption dalam komposit berpenguat serat alami dapat ditingkatkan dengan memodifikasi permukaan serat alami tersebut [8].

Dari referensi tersebut penulis melakukan penelitian untuk mengetahui perubahan sifat fisis dan kekuatan bending bahan komposit tapis kelapa/Polyester bila serat diberi perlakuan NaOH dan fraksi volume serat divariasikan serta variasi lama perendaman komposit pada air tawar atau air laut. Perlakuan terhadap serat tersebut adalah perendaman dengan bahan kimia NaOH dengan persentase masing-masing 0,5%, 1% dan 2% berat, persentase fraksi volume serat pada komposit yaitu 0%, 5%, 7.5%, 10%, serta lama perendaman di dalam air tawar maupun air laut masing-masing 24 jam, 48 jam, 98 jam dan 196 jam. Pengujian spesimen dilakukan dengan uji three point bending dengan standar ASTM D790-03.

2. Metodologi

Bahan

- Tapis kelapa sebelum diberi perlakuan dikeringkan dahulu secara alami guna mengurangi kadar air yang terkandung di dalamnya.
- Bahan untuk matrik adalah Polyester.
- Hardener
- Bahan kimia untuk perlakuan terhadap Tapis kelapa adalah NaOH.
- Pelapis (coating) untuk memberikan lapisan agar material benda kerja tidak lengket dengan cetakan.
- Air tawar.

Alat-alat

- Cetakan yang terbuat dari kaca dengan ukuran lubang dalam adalah 300 mm x 300 mm.
- Mesin pemotong spesimen untuk membuat sesuai standar ASTM D790-03.
- Mesin uji three point bending.
- Gunting untuk memotong Tapis kelapa, sarung tangan.
- Kontainer (ember) untuk merendam dan membilas tapis kelapa dan untuk merendam komposit.
- Saringan untuk menyaring potongan tapis kelapa sewaktu membilas.

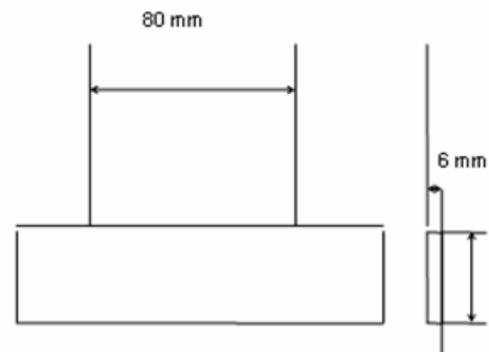
Langkah Penelitian

Pembuatan Spesimen Uji

- Tapis Kelapa dikeringkan secara alami untuk menghilangkan kadar air.
- Bersihkan tapis kelapa dari kotoran ataupun getah yang masih menempel untuk memudahkan proses pemisahan serat.
- Rendam tapis kelapa yang telah dipisahkan tersebut ke dalam zat kimia NaOH dengan variasi yang telah ditentukan selama 2 jam kemudian bilas dengan air sampai bersih.
- Potong tapis kelapa yang sudah dibersihkan menjadi bagian kecil berukuran 10 mm secara memanjang dan cari fraksi volumenya.
- Kemudian keringkan kembali potongan serat tapis kelapa di dalam oven selama 24 jam dengan suhu 60° C.
- Lapsi cetakan kaca dengan *Gliserin* agar resin tidak melekat pada cetakan, ratakan dengan *Tissue* untuk menipiskan lapisan *Gliserin*.
- Tempatkan bingkai cetakan sesuai dengan tebal komposit yang akan dibuat.
- Campurkan resin dengan 1% hardener dalam gelas ukur yang disediakan dan catat volume campuran setiap penuangan.
- Campuran *polyester* dituangkan secara uniform sebagai lapisan pertama ke dalam cetakan, dan lapisan kedua yaitu tapis kelapa diletakkan di atas lapisan pertama. Lapisan kedua dari campuran *polyester* ditambahkan sampai mendekati ketebalan yang diinginkan (3 mm)
- Cetakan yang telah berisi komposit dimasukkan kedalam *Vacuum Dessicator* sampai tekanan -60 cmHg.
- Tujuannya untuk menghilangkan gelembung-gelembung udara dan uap air yang terperangkap pada komposit dan untuk mengetahui apakah komposit sudah homogen yaitu jika lembaran komposit tidak melengkung.
- Keluarkan cetakan dari *Vacuum Dessicator* dan keringkan selama 4 hari di udara terbuka.

Setelah benar-benar kering keluarkan komposit dari cetakan.

- Pengamatan Bentuk Fisik Lembaran Komposit, komposit yang berhasil dicetak, diamati apakah ada *void* atau tidak dengan cara menerawang lembaran komposit. *Void* tidak boleh mengumpul pada suatu tempat dan diameter *void* tidak boleh lebih dari 1 %. Komposit dinyatakan *homogen* jika tidak terdapat cacat dan *void* yang mengumpul.
- Potong spesimen uji sesuai dengan standar ASTM D790-03 untuk uji bending. Dalam pemotongan disini dipilih spesimen yang voidnya sesuai dengan ketentuan di atas, dan spesimen tersebut dalam keadaan datar (tidak melengkung).
- Spesimen uji yang telah dipotong sesuai standar ASTM D790-03 untuk uji bending dan dikeringkan dalam oven pada temperatur 50° C
- Kemudian spesimen direndam masing-masing di dalam air tawar dengan variasi waktu 24 jam, 48 jam, 98 jam dan 196 jam.
- Lanjutkan dengan pengkodean dan lakukan uji-uji tersebut di atas.



Gambar 2. Spesimen uji bending menurut ASTM D790

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Uji Water Absorption

Berdasarkan hasil penelitian didapat perbedaan berat spesimen sebelum dan setelah direndam dalam air dengan lamanya perendaman selama 0 jam, 24 jam, 48 jam, 96 jam dan 192 jam seperti pada Tabel 2.

Dari nilai tabel data water absorption kemudian diplot kedalam grafik dan didapat hasil grafik perbandingan antara persentase *Water-Absorption* ($\Delta M_{(t)}$) - lama perendaman untuk masing-masing perlakuan NaOH seperti pada gambar 3.

Tabel 2. Data water-absorption

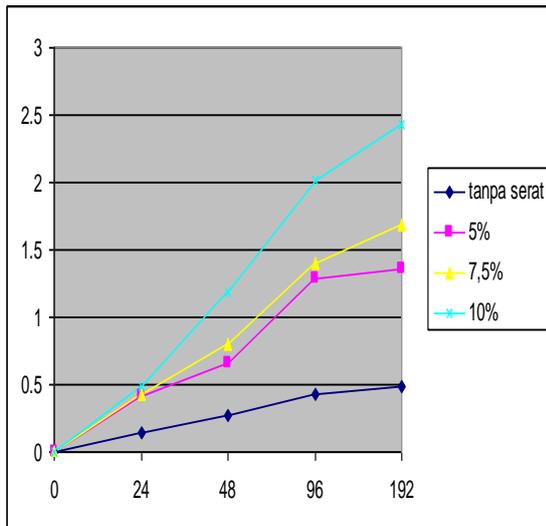
Persentase NaOH 1%	W ₀ (gram)				W _t (gram)				ΔM(t) (%)			
	Fraksi Volume				Fraksi Volume				Fraksi Volume			
	0%	5%	7,5%	10%	0%	5%	7,5%	10%	0%	5%	7,5%	10%
Tanpa Perendaman	77	91.17	92.6	95.11	77	91.17	92.6	95.11	0	0	0	0
Perendaman (24 jam)	78.3	91.18	92.6	95.11	78.41	91.56	93	95.57	0.142	0.416	0.4319	0.483
Perendaman (48 jam)	82.77	91.22	92.85	115.88	83	91.82	93.59	117.05	0.277	0.657	0.796	1.184
Perendaman (96 jam)	76.03	91.27	92.71	104.04	76.36	92.45	94.01	106.13	0.434	1.292	1.402	2.008
Perendaman (192 jam)	74.18	91.29	92.97	106.02	74.54	92.53	94.54	108.39	0.485	1.358	1.688	2.424

Keterangan:

W₀ = Berat Awal Spesimen (gram)

W_t = Berat Spesimen Setelah Perendaman (gram)

ΔMt = Persentase Water Absorption (%)

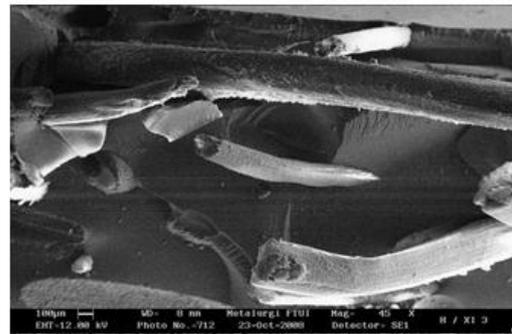


Gambar 3. Pengaruh waktu perendaman dalam air tawar terhadap persentase water absorption komposit polyester-tapis kelapa untuk masing-masing fraksi volume

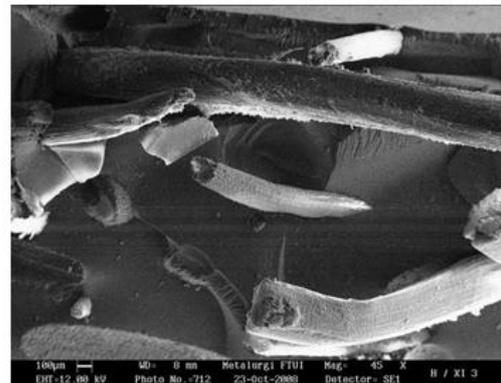
3.2. Pembahasan Uji Water Absorption

Berdasarkan gambar 3 dapat dilihat bahwa persentase *Water-Absorption* meningkat seiring bertambahnya waktu perendaman. Dapat dilihat juga bahwa perendaman selama 96 jam merupakan titik penyerapan air tertinggi dan untuk waktu selanjutnya penyerapan air masih mengalami peningkatan namun dalam persentase yang kecil. Serat alam memiliki sifat yang mampu menyerap air mencapai titik jenuh dalam waktu tertentu. Kapilarisasi terjadi secara hampir linier dan terjadi secara lambat hingga mencapai keadaan jenuh dalam waktu yang lama (Dhakal et.al, 2006). Karena adanya celah diantara ikatan matrik dengan serat yang membuat aliran air dapat masuk secara kapilarisasi. Sedangkan pada komposit tanpa serat tidak begitu ter jadi penyingkatan yang berarti, karena polyester tersebut tidak menyerap air, peningkatan berat polyester terjadi karena air menyusup pada bagian celah-celah polyester yang terjadi akibat proses pemotongan specimen.

Fraksi Volume sangat berpengaruh terhadap persentase *Water-Absorption* komposit. Pada gambar 3 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase fraksi volume, persentase *Water-Absorption* semakin naik. Terlihat dalam gambar 3 komposit tanpa serat memiliki persentase yang rendah jika dibandingkan dengan fraksi volume 5%, maupun fraksi volume lainnya. Pada komposit tanpa serat, tidak ada ikatan antara matriks dengan seratnya. Jadi tidak terjadi penyerapan air yang mengakibatkan perubahan berat. Sedangkan pada fraksi volume 10%, jumlah serat pada komposit tersebut lebih banyak, maka terjadi penyerapan air secara kapilarisasi yang cukup banyak diantara serat dengan celah komposit tersebut. Sehingga berat komposit menjadi bertambah dan lebih berat dari pada fraksi volume yang lainnya.



Gambar 4. Foto SEM komposit fraksi volume, 10% dan direndam dalam air tawar selama 48 jam



Gambar 5. Foto EM komposit fraksi volume, 10% dan direndam dalam air tawar selama 192 jam

Foto hasil SEM pada gambar 4 dimana seratnya masih kasar dan ulet. Untuk komposit dengan perendaman 48 jam adalah titik tertinggi kekuatan serat pada fraksi 10%, dimana air yang diserap belum terlalu banyak dan ikatan serat dengan matrik masih cukup kuat. Sedangkan pada 192 jam (gambar 5) penyerapan air yang terjadi pada serat sudah mencapai titik jenuh, serat menjadi rusak dan berakibat ikatan matrik dengan seratnya menjadi kurang kuat.

3.3 Uji Lentur

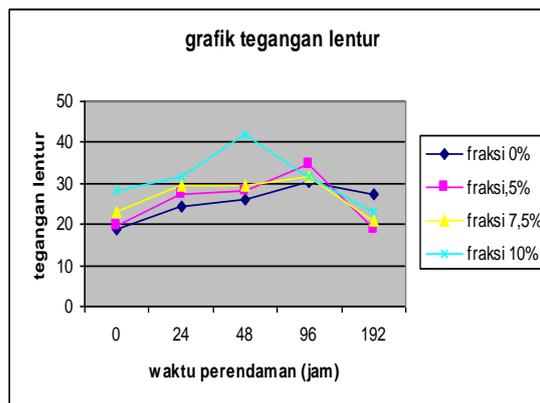
Pengujian lentur juga dilakukan di Laboratorium Logam Universitas Brawijaya Malang dan didapatkan hasil seperti pada Tabel 3. Setelah didapatkan hasil di atas, kemudian data-data tersebut di masukan ke dalam grafik sehingga didapat grafik pengaruh lama perendaman dalam air tawar terhadap kekuatan lentur dan modulus elastisitas lentur komposit untuk masing-masing Fraksi volume.

Tabel. 3. Nilai rata-rata hasil uji lentur

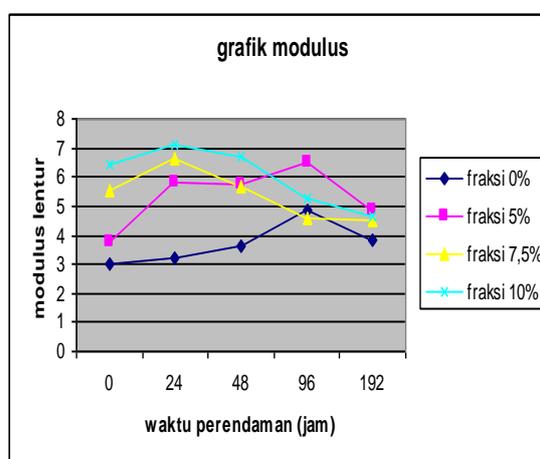
Persentase NaOH 1%		Tegangan Lentur Rata-rata (MPa)	Regangan Lentur Rata-rata (%)	Elastisitas Lentur (GPa)
Fraksi volume serat 0%	0 jam	13.700	0.0046	3.023
	24 jam	17.847	0.0054	3.197
	48 jam	19.527	0.0056	3.599
	96 jam	22.047	0.0062	4.871
	192jam	23.097	0.0041	3.822
Fraksi volume serat 5%	0 jam	20.997	0.0052	3.749
	24 jam	23.097	0.0046	5.823
	48 jam	25.196	0.0049	5.729
	96 jam	29.396	0.0054	6.527
	192jam	14.498	0.0041	4.837
Fraksi volume serat 7,5%	0 jam	23.097	0.0041	5.543
	24 jam	29.396	0.0044	6.64
	48 jam	29.396	0.0052	5.644
	96 jam	31.496	0.0049	4.607
	192jam	20.997	0.0046	4.479
Fraksi volume serat 10%	0 jam	28.346	0.0047	6.403
	24 jam	31.496	0.0044	7.114
	48 jam	41.994	0.0062	6.719
	96 jam	31.496	0.0059	5.25
	192jam	23.097	0.0049	4.668

3.4. Pembahasan Uji Lentur

Hasil pengujian lentur mengalami peningkatan nilai tegangan. Dapat dilihat pada gambar, komposit dengan fraksi 10% mengalami peningkatan nilai tegangan lentur pada perendaman selama 48 jam. Sama dengan tegangan tarik, nilai tegangan lentur akan mengalami penurunan setelah mencapai titik jenuhnya. Lamanya perendaman menyebabkan serat menjadi rapuh (rusak) yang menyebabkan turunnya kelenturan serat.



Gambar 6. Pengaruh waktu perendaman dalam air tawar terhadap tegangan lentur komposit polyester-tapis kelapa untuk masing-masing fraksi volume



Gambar 7. Pengaruh waktu perendaman dalam air tawar terhadap modulus elastisitas lentur komposit polyester-tapis kelapa untuk masing-masing fraksi volume

Selain hal di atas, fraksi volume juga mempengaruhi nilai tegangan lentur dari komposit. Nilai tegangan lentur yang maksimum tertinggi sebesar 41,994 MPa dengan perlakuan NaOH 1% dan fraksi volume 10%, sedangkan nilai terendah sebesar 30,446 MPa pada fraksi 0% dengan waktu perendaman 96jam. Hal ini terjadi karena pada fraksi 10% serat memiliki kemampuan transfer beban dengan baik dibandingkan komposit tanpa serat.

Modulus lentur yang terjadi akibat perendaman komposit pada air ditunjukkan pada gambar 7. Perubahan yang terjadi pada modulus elastisitas lentur pada komposit menunjukkan bahwa fraksi 10% pada 24 jam memiliki nilai modulus yang paling besar diantara fraksi volume yang lain yaitu sebesar 7,114 GPa

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa *Water-absorption* pada *polyester* (tanpa serat) paling kecil dibandingkan dengan *water-absorption* yang terjadi pada komposit yang diperkuat serat tapis kelapa. Semakin besar fraksi volume serat pada

komposit menyebabkan peningkatan *water absorpton*. Komposit dengan serat yg tidak di-*treatment* dengan NaOH cenderung memiliki daya serap air yang lebih tinggi dari pada yang diberi perlakuan.

Kekuatan bending rata-rata komposit dengan serat tanpa *treatment* lebih rendah dibandingkan dengan komposit dengan serat yang di-*treatment* NaOH, hal ini terjadi karena kecilnya persentase dan perbedaan persentase NaOH yang digunakan pada penelitian ini, sehingga hampir tidak signifikan perbedaan kekuatannya. Kekuatan bending yang paling tinggi terjadi pada lama perendaman 48 jam prosentase NaOH 1% dan 10% fraksi volume serat sebesar 41,994 Mpa. Sedangkan modulus bending paling tinggi dihasilkan pada komposit dengan fraksi volume 10% sebesar 7.114 GPa.

Daftar Pustaka

- [1] Oksman, K., Skrifvars, M., Selin, J-F., 2003, *Natural Fibers As Reinforcement in Polylactic Acid (PLA) Composites*, Composites science and technology 63, Scindirect.com, 1317-1324.
- [2] Mohan Rao, K.M., and Mohana Rao, K., 2005 *Extraction And Tensile Properties Of Natural Fibers: Vakka, Date and Bamboo*, Elsevier, Composite structures.
- [3] Sapuan, S.M., A. Leenie., M. Harimi., Y.K. Beng., 2005, *Mechanical Properties Of Woven Banana Fiber Reinforced Epoxy Composites*, Elsevier Ltd, Material and design,
- [4] Brahmakumar, M., Pavithran, C., and Pillai, R.M., *Coconut Fiber Reinforced Polyethylene Composites Such As Effect Of Natural Waxy Surface Layer Of The Fiber On Fiber Or Matrix Interfacial Bonding And Strength Of Composites*, Elsevier, Composite Science and Technology, 65 (2005) 563-569
- [5] Lokantara, Suardana, 2007, *Pengaruh Arah Dan Metode Perlakuan Serat Tapis Serta Ratio Epoxy Hardener Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis Komposit Tapis/Epoxy*, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin "Cakram" 15-21
- [6] Wang, W, Sain, M, Copper, P.A., 2005, *Study of Moisture Absorption in Natural Fiber Plastic Composites*. Composites Science and Technology 66 (2006) 379-386.
- [7] Errajhi, O.A.Z, Osborne, J.R.F, Richardson, M.O.W, Dhakal, H.N., 2005, *Water Absorption Characteristic of Aluminised E-glass Fibre Reinforced Unsaturated Poliéster Composites*, Composite Structures 71 (2005) 333-336.
- [8] Chow, C.P.L, Xing, X.S, Li, R.K.Y., 2006, *Moisture Absorption Studies of Sisal Fibre Reinforced Polypropylene Composites*. Composites Science and Technology 67, 306-313.
- [9] Dhakal, H.N, Zhang, Z.Y, Richardson, M.O.W, 2006, *Effect of Water Absorption on The Mechanical Properties of Hemp Fibre Reinforced Unsaturated Polyester Composites*, Composites Science and Technology.
- [10] Siriwardena, S., Ismail, Ishiaku, 2003, *A comparison of the mechanical properties and water absorption behavior of white rice husk ash and silica filled polypropylene composites*, Journal of reinforced plastics and composites, vol. 22; No.18 pp.1645-1666.