

11-2-2009

Mechanical properties of ramie fiber reinforced epoxy lamina composite for socket prosthesis

Tresna P. Soemardi

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia, agustinus01@yahoo.com

Widjajalaksmi Kusumaningsih

Fakultas Kedokteran, Universitas Indonesia, Jakarta 10430, Indonesia

Agustinus Purna Irawan

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

Follow this and additional works at: <https://scholarhub.ui.ac.id/mjt>



Part of the [Chemical Engineering Commons](#), [Civil Engineering Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Electrical and Electronics Commons](#), [Metallurgy Commons](#), [Ocean Engineering Commons](#), and the [Structural Engineering Commons](#)

Recommended Citation

Soemardi, Tresna P.; Kusumaningsih, Widjajalaksmi; and Irawan, Agustinus Purna (2009) "Mechanical properties of ramie fiber reinforced epoxy lamina composite for socket prosthesis," *Makara Journal of Technology*. Vol. 13: Iss. 2, Article 8.

DOI: 10.7454/mst.v13i2.487

Available at: <https://scholarhub.ui.ac.id/mjt/vol13/iss2/8>

This Article is brought to you for free and open access by the Universitas Indonesia at UI Scholars Hub. It has been accepted for inclusion in Makara Journal of Technology by an authorized editor of UI Scholars Hub.

KARAKTERISTIK MEKANIK KOMPOSIT LAMINA SERAT RAMI EPOKSI SEBAGAI BAHAN ALTERNATIF SOKET PROSTESIS

Tresna P. Soemardi¹, Widjajalaksmi Kusumaningsih², dan Agustinus Purna Irawan^{1*)}

1. Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

2. Fakultas Kedokteran, Universitas Indonesia, Jakarta 10430, Indonesia

*)E-mail: agustinus01@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik mekanik komposit serat alam khususnya serat rami dengan matriks epoksi yang akan diaplikasikan sebagai bahan alternatif pada desain soket prostesis. Fokus penelitian adalah pengujian komposit lamina serat rami epoksi mengacu standar *American Society for Testing Material* (ASTM) D 3039/D 3039M untuk pengujian tarik dan ASTM D 4255/D 4255M-83 untuk pengujian geser. Serat rami yang digunakan adalah serat kontinu dengan kode produksi 100% Ne 14'S, menggunakan matriks berupa Epoxy Resin Bakelite EPR 174 dan Epoxy Hardener V-140. Metode pembuatan sampel uji komposit lamina dengan cara *hand lay up* terhadap serat rami kontinu pada suhu kamar. Hasil pengujian karakteristik mekanik komposit serat rami epoksi akan dibandingkan dengan standard ISO untuk bahan plastik/polymer yang diaplikasikan pada bidang kesehatan, khususnya untuk *Prosthetics* dan *Orthotics*. Analisis dilengkapi dengan hasil pengamatan berbantuan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui modus kegagalan dan kriteria kegagalan. Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa komposit lamina serat rami epoksi berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif dalam pembuatan soket prostesis atas lutut pada Vf 40-50%. Hasil penelitian akan dibahas secara lebih detail dalam makalah ini.

Abstract

Mechanical properties of ramie fiber reinforced epoxy lamina composite for socket prosthesis. This paper presents an investigation into the application of natural fiber composite especially ramie fiber reinforced epoxy lamina composite for socket prosthesis. The research focuses on the tensile and shear strength from ramie fiber reinforced epoxy lamina composite which will be applied as alternative material for socket prosthesis. The research based on American Society for Testing Material (ASTM) standard D 3039/D 3039M for tensile strength and ASTM D 4255/D 4255M-83 for shear strength. The ramie fiber applied is a fiber continue 100 % Ne14'S with Epoxy Resin Bakelite EPR 174 as matrix and Epoxy Hardener V-140 as hardener. The sample composite test made by hand lay up method. Multiaxial characteristic from ramie fiber reinforced epoxy composite will be compared with ISO standard for plastic/polymer for health application and refers strength of material application at Prosthetics and Orthotics. The analysis was completed with the mode of the failure and the failure criterion observation by using Scanning Electron Microscope (SEM). Based on results of the research could be concluded that ramie fiber reinforced epoxy composite could be developed further as the alternative material for socket prosthesis on Vf 40-50%. Results of the research will be discussed in more detail in this paper.

Keywords: mechanical properties, ramie fiber reinforced epoxy lamina composite, socket prosthesis

1. Pendahuluan

Prostesis merupakan produk tiruan yang berfungsi sebagai komponen pengganti bagian tubuh yang mengalami kerusakan atau trauma. Salah satu produk prostesis yang dikembangkan secara berkelanjutan adalah prostesis atas lutut [1-4]. Pengembangan prostesis atas lutut berteknologi menengah terfokus

pada material plastik dan komposit dengan serat sintesis seperti yaitu *fiberglass*, serat carbon dan serat *nyglass* [5-6]. Pengembangan prostesis atas lutut dengan menggunakan bahan komposit dengan serat alam belum dilakukan. Jika dilihat dari potensi serat alam yang besar di Indonesia seperti serat rami, dan isu tentang penggunaan bahan-bahan alami yang dapat didaur ulang dan ramah lingkungan, maka pengembangan prostesis

atas lutut dengan bahan komposit serat rami mempunyai peluang yang cukup besar untuk diteliti dan dikembangkan lebih lanjut [7].

Craig [8] merekomendasikan bahan prostesis dengan kriteria dasar: 1) *low cost*, 2) *locally available*, 3) *capable of manual fabrication*, 4) *considerate of local climate and working conditions (barefoot or sandal wear including rice farming in flooded fields)*, 5) *durable*, 6) *simple to repair*, 7) *simple to process using local production capability*, 8) *reproducible by local personnel*, 9) *technically functional*, 10) *bio mechanically appropriate*, 11) *as lightweight as possible*, 12) *adequately cosmetic*, and 13) *psychosocially acceptable*. Dengan demikian, pemanfaatan material lokal seperti serat rami yang banyak tersedia di Indonesia dengan harga yang murah merupakan salah satu pilihan yang tepat.

Pemilihan serat rami sebagai bahan penelitian didasarkan pada pertimbangan atas potensi serat rami di Indonesia yang berlimpah dan belum dimanfaatkan secara baik. Termasuk didalamnya adalah isu tentang lingkungan, dimana saat ini berkembang pandangan baru tentang *go green*, kembali ke alam dan isu tentang pengurangan limbah yang berbahaya. Serat rami yang berasal dari serat alam sangat berpotensi untuk dikembangkan dan memenuhi kriteria penggunaan bahan alami. Demikian juga jika dilihat dari sisi kekuatan. Hasil-hasil penelitian yang telah dipublikasikan oleh peneliti sebelumnya menunjukkan bahwa serat mempunyai rasio kekuatan yang baik dan ringan. Sifat ini sangat diperlukan dalam pengembangan bahan untuk soket prostesis [9-17].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan material komposit berpenguat serat alam dengan matriks epoksi yang akan diimplementasikan dalam pembuatan soket prostesis kaki palsu. Fokus penelitian adalah untuk menghasilkan karakteristik mekanik komposit lamina serat rami epoksi yang akan digunakan sebagai bahan alternatif pada soket prostesis.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilaksanakan dengan membuat dan menguji sampel uji komposit dengan mengacu ASTM D 3039/D 3039M untuk uji tarik dan ASTM D 4255/D 4255M-83 untuk uji geser [18]. Jumlah masing-masing sampel uji sebanyak 6 buah dengan fraksi volume serat, Vf: (10%, 20%, 30%, 40%, 50%). Serat rami yang digunakan berupa serat kontinu jenis ramie 100% Ne.14'S yang diperoleh dari pabrik di Tangerang. Matriks yang digunakan berupa Epoxy Resin Bakelite® EPR 174 dengan Epoxy Hardener V-140 dan Mirror Glaze/MGH No. 8. Perbandingan resin dan *hardener* adalah 1 : 1. Metode pembuatan sampel uji adalah *hand lay-up*.

Hasil uji sampel komposit disajikan dalam bentuk hubungan antara kekuatan tarik (σ_t), kekuatan geser (τ), modulus elastistas (E), modulus geser (G) vs fraksi volume serat (Vf). Hasil pengujian dibandingkan dengan hasil perhitungan teoretik data komposit serat rami [19]. Observasi kegagalan dilakukan dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk mengamati modus kegagalan dan kriteria kegagalan. Hasil akhir penelitian dibandingkan dengan Standard ISO untuk bahan plastik/polimer yang diaplikasikan pada bidang kesehatan [20] dan mengacu penelitian yang berkaitan dengan bahan prostesis.

3. Hasil dan Pembahasan

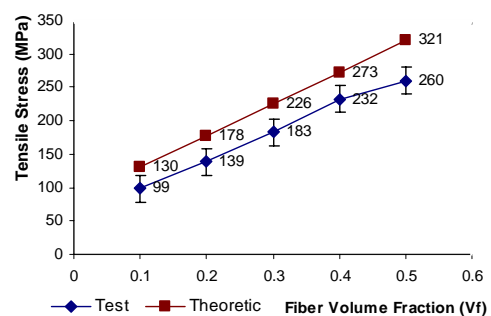
Berdasarkan pengujian dengan mengacu standar ASTM, diperoleh karakteristik mekanik komposit lamina serat rami epoksi (Tabel 1). Hasil pengujian tarik dan geser lamina longitudinal dan transversal, dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Uji Tarik Lamina Longitudinal (0°). Hasil pengujian tarik sampel uji lamina arah longitudinal terlihat bahwa kenaikan fraksi volume serat sampai 50%.

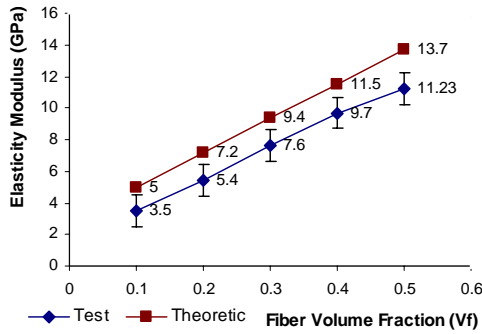
Hasil pengujian tarik sampel uji lamina arah longitudinal terlihat bahwa kenaikan fraksi volume serat sampai 50% menghasilkan tegangan tarik maksimum sampai 260 MPa dengan modulus elastisitas terbesar, yaitu 11,23 GPa. Kecenderungan kenaikan tegangan tarik dan modulus elastistas sesuai dengan kecenderungan secara teoretik. Jika data pada Tabel 1 dibandingkan dengan hasil perhitungan secara teoretik, maka perbedaan yang terjadi rata-rata 19%. Sedangkan

Tabel 1. Kekuatan Tarik dan Geser Matriks dan Serat

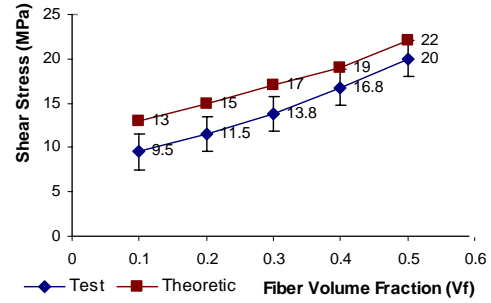
No	Karakteristik	Harga
1	Kekuatan tarik fiber maksimum, σ_{uf}	560 MPa
2	Kekuatan geser fiber maksimum, τ_{uf}	36 MPa
3	Elongation fiber	2,87%
4	Kekuatan tarik matriks maksimum, σ_{um}	40 MPa
5	Kekuatan geser matriks maksimum, τ_{um}	34 MPa



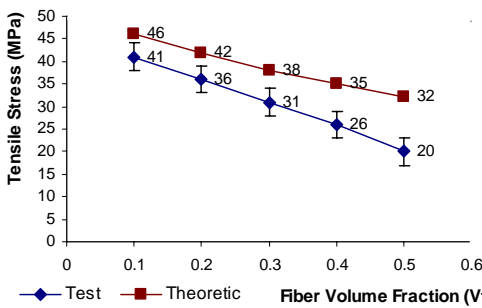
Gambar 1. Grafik σ_1 vs Vf Lamina Longitudinal



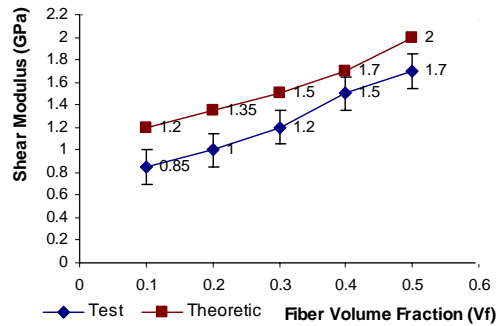
Gambar 2. Grafik E_1 vs Vf Lamina Longitudinal



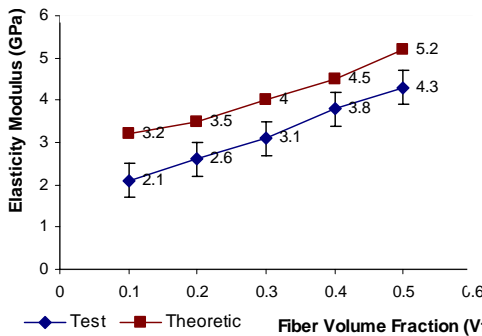
Gambar 5. Grafik τ_{12} vs Vf Lamina



Gambar 3. Grafik σ_2 vs Vf Lamina Transversal (90°)



Gambar 6. Grafik G_{12} vs Vf Lamina



Gambar 4. Grafik E_2 vs Vf Lamina Transversal (90°)

modulus elastisitas yang diperoleh dari pengujian pada Vf 50% mempunyai perbedaan sebesar 20% dari hasil teoretik. Hal ini dapat terjadi karena dalam perhitungan teoretik, kondisi yang digunakan adalah kondisi ideal. Pada kenyataannya, pembuatan lamina yang sesuai dengan kondisi ideal sulit untuk dilakukan dan kemungkinan terjadi retak mikro dan void. Demikian juga dengan penggunaan bahan-bahan yang langsung diperoleh dari pasaran umum tanpa perlakuan tambahan terhadap benang serat rami sangat mempengaruhi kondisi ideal yang bisa dicapai.

Uji Geser Lamina. Hasil pengujian geser lamina menunjukkan kecenderungan kenaikan tegangan geser seiring dengan kenaikan fraksi volume serat. Pada fraksi

volume serat peningkatan Vf 50%, tegangan geser yang diperoleh adalah sebesar 20 MPa. Hasil ini mendekati hasil perhitungan teoretik, yaitu sebesar 22 MPa.

Perbedaan yang terjadi rata-rata untuk semua pengujian sebesar 18%. Perbedaan yang terjadi dari modulus geser yang diperoleh dari pengujian juga tidak terlalu besar, yaitu 20%. Tegangan geser dan modulus geser yang dihasilkan melalui pengujian lebih rendah jika dibandingkan dengan kondisi ideal secara teoretik. Kondisi ideal seperti pada perhitungan teoritis sulit dicapai karena serat rami yang digunakan merupakan serat berupa benang yang tersedia di pasaran bebas tanpa memperoleh perlakuan lanjutan sebelum digunakan. Kondisi riil sesuai yang ada di pasaran bebas ini mempermudah dalam proses berikutnya tanpa mengurangi kemampuan dan kekuatan yang dihasilkan oleh komposit serat rami epoksi.

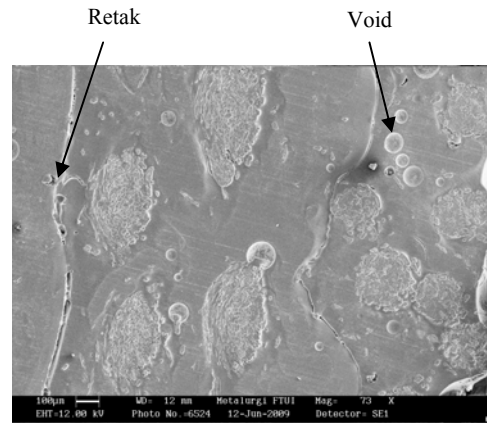
Modus Kegagalan. Untuk mendapatkan gambaran yang lebih nyata terhadap modus kerusakan sampel uji komposit serat rami epoksi, dilakukan foto SEM (*Scanning Electron Microscope*) terhadap sampel uji tarik. Foto SEM dilakukan terhadap sampel uji yang belum rusak dan dibandingkan dengan bagian sampel uji yang telah rusak akibat beban yang diterima.

Melalui pembesaran 40X (Gambar 7) terlihat bahwa sampel uji yang dibuat mempunyai bagian yang mengalami cacat awal akibat proses pembuatan berupa

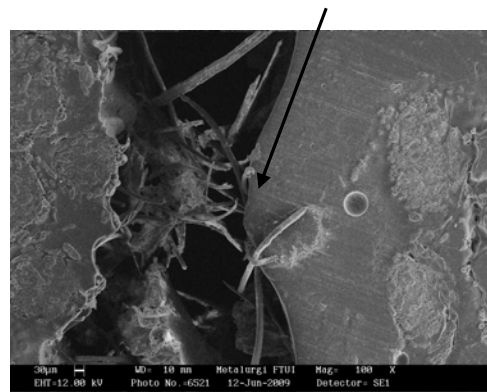
retak mikro dan sedikit terdapat void. Setelah dilakukan pengujian terlihat bahwa sebagian serat terputus dan tercabut dari matriks dan mengalami *debonding*.

Melalui pembesaran 70X (Gambar 8) terlihat bahwa sampel uji sebelum diuji kondisinya cukup baik, terlihat sedikit void dan retak mikro. Setelah dilakukan pengujian tarik terlihat sebagian serat terputus dan tercabut dari matriks dan mengalami *debonding*.

Berdasarkan analisis hasil pengujian, modus kegagalan yang terjadi pada komposit rami epoksi meliputi *brittle failure* (getas) untuk Vf 10-30%, *debonding* dan delaminasi Vf 40-50%. Hasil analisis didukung data pengujian SEM terhadap sampel sebelum dan setelah diuji. Sebagian sampel uji mengalami retak mikro, terutama pada daerah antar lapisan komposit, mengalami sedikit void yang dapat berpengaruh terhadap kekuatan komposit yang dibuat, serta terjadinya serat patah, tercabut dari matriks, terjadinya *debonding* dan delaminasi antara serat dan matriks. [19] Pada Vf 10-30%, penyebab kerusakan utama karena serat yang tidak mampu menahan beban tarik sehingga terjadi patah getas. Sedangkan pada Vf 40-50%,

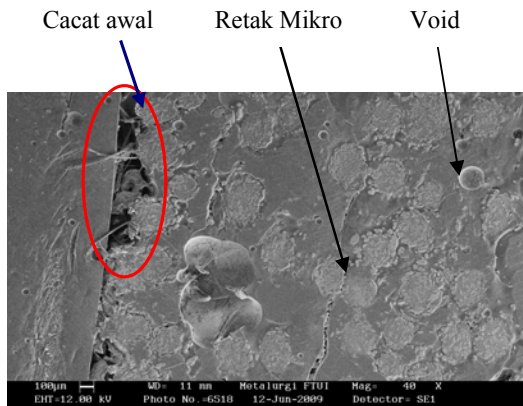


(a)
Rusak, tercabut dan
Debonding



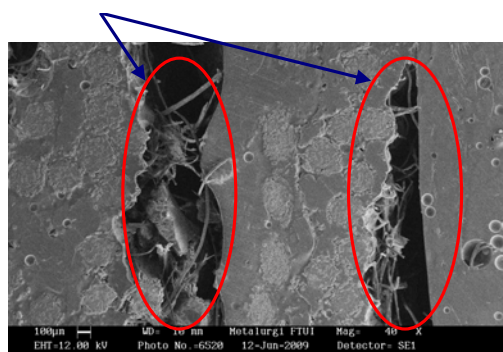
(b)

Gambar 8. Foto SEM Sampel Uji Tarik Vf 20% Sebelum (a) dan Setelah Diuji (b)



(a)

Debonding



(b)

Gambar 7. Foto SEM Sampel Uji Tarik Lamina Vf 50% Sebelum (a) dan Setelah Diuji (b)

kerusakan disebabkan oleh ketidakmampuan matriks untuk menerima beban tarik yang lebih besar sehingga terjadi delaminasi dan *debonding*.

Hal ini harus menjadi perhatian pada saat pembuatan prototipe soket protesis sehingga prototipe yang dibuat tidak mengalami retak mikro, void dan mempunyai permukaan yang baik. Perlu dilakukan perencanaan proses produksi prototipe soket secara teliti dengan mempertimbangkan modus dan penyebab kegagalan yang terjadi pada komposit serat rami epoksi.

Fraksi volume serat (Vf) yang digunakan dibatasi sampai 50%. Hal ini mempertimbangkan kemampuan matriks untuk membasahi (diserap) oleh serat yang makin menurun dengan bertambahnya Vf. Jika Vf diberikan lebih dari 50% maka kegagalan yang akan terjadi pada komposit adalah *debonding* dan delaminasi, pada beban yang rendah akibat ikatan antara serat dan matriks yang lemah. Kecenderungan penurunan

kekuatan terlihat pada grafik hasil pengujian tarik dan geser di atas [16].

Kriteria Kegagalan. Berdasarkan hasil penelitian aksial tarik dan geser yang telah dilakukan, maka dapat dibuat *envelope* kegagalan multiaksial semi eksperimental komposit rami epoksi. Kriteria kegagalan yang dipergunakan meliputi *Maximum Stress Failure Theory*, *Maximum Strain Failure Theory*, *Tsai-Hill Failure Theory*.

Maximum Stress Failure Theory. Persamaan umum *Maximum Stress Failure Theory* adalah:

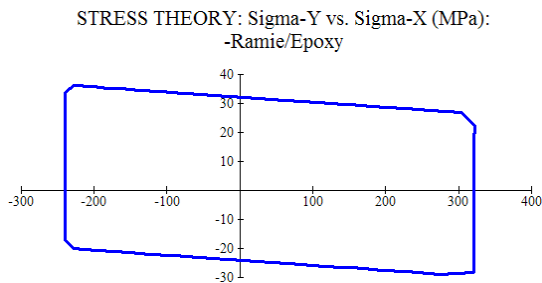
$$-(\sigma_1^C)_{ult} < \sigma_1 < (\sigma_1^T)_{ult} \text{ atau } -(\sigma_2^C)_{ult} < \sigma_2 < (\sigma_2^T)_{ult} \text{ atau } -(\tau_{12})_{ult} < \tau_{12} < (\tau_{12})_{ult} \quad (1)$$

Kegagalan terjadi jika salah satu dari komponen tegangan: $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ mencapai tegangan yang diizinkan.

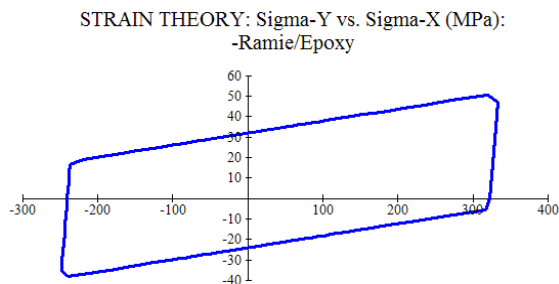
Maximum Strain Failure Theory. Persamaan umum *Maximum Strain Failure Theory* adalah:

$$-(\varepsilon_1^C)_{ult} < \varepsilon_1 < (\varepsilon_1^T)_{ult} \text{ atau } -(\varepsilon_2^C)_{ult} < \varepsilon_2 < (\varepsilon_2^T)_{ult} \text{ atau } -(\gamma_{12})_{ult} < \gamma_{12} < (\gamma_{12})_{ult} \quad (2)$$

Kegagalan terjadi jika salah satu dari komponen regangan: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ mencapai tegangan yang diizinkan.



Gambar 9. *Envelope* Kegagalan *Maximum Stress Failure Theory*



Gambar 10. *Envelope* Kegagalan *Maximum Strain Failure Theory*

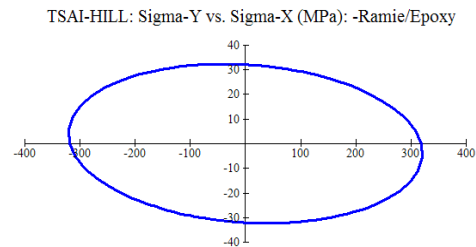
Tsai Hill Failure Theory. Persamaan umum:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

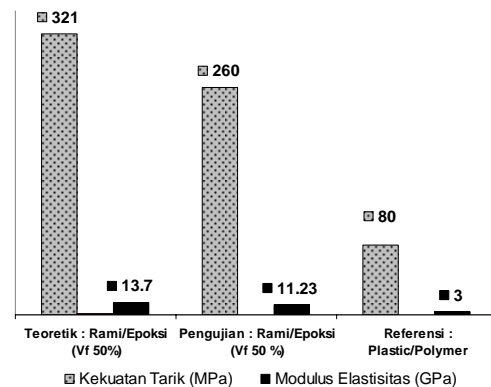
Kegagalan terjadi jika salah satu dari komponen tegangan: $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ mencapai tegangan yang diizinkan. *Envelope* kegagalan komposit serat rami epoksi berdasarkan kriteria kegagalan seperti pada Gambar 9, 10 dan 11 dapat dijadikan acuan untuk menghitung kekuatan dalam menerima beban. Jika tegangan yang terjadi masih berada dalam *envelope*, maka struktur komposit yang dirancang dapat menerima beban dengan aman [19].

Berdasarkan ISO 10328-3:1996: *Structural testing of lower limb prosthesis*, beban pengujian pada komponen prosthesis atas lutut yang harus diberikan adalah lebih besar atau sama dengan 100 kg [20]. Jika diasumsikan ketebalan dinding socket yang akan dibuat sebesar 4-6 mm, maka pada Vf 50%, bahan socket prosthesis masih mampu menerima beban dengan aman atau masih berada di dalam *envelope* kegagalan.

Perbandingan terhadap kekuatan bahan socket prosthesis berdasarkan standar ISO untuk bahan plastik/polimer yang diaplikasikan pada bidang kesehatan (Gambar 2) [20].



Gambar 11. *Envelope* Kegagalan *Tsai Hill Failure Theory*



Gambar 12. Perbandingan Lamina Hasil Uji-Teoretik-Referensi

Secara umum, hasil uji terhadap sampel uji komposit lamina serat rami epoksi (Gambar 12) memenuhi kriteria minimal yang dijadikan referensi dalam penelitian ini, yaitu bahan plastik/polimer yang diaplikasikan di bidang kesehatan dengan kekuatan tarik minimal 80 MPa dan modulus elastisitas 3 GPa [20].

Berdasarkan hasil pengujian tarik komposit rami epoksi lamina longitudinal fraksi volume serat 40% diperoleh kekuatan tarik sebesar 232 MPa dengan modulus elastisitas 9,7 GPa dan pada fraksi volume serat 50% diperoleh kekuatan tarik 260 MPa dengan modulus elastisitas 11,23 GPa. Dapat disimpulkan bahwa dari sisi kekuatan tarik dan modulus elastisitas, komposit serat rami epoksi sangat berpeluang untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai bahan alternatif untuk membuat soket prosthesis atas lutut.

Hasil penelitian ini perlu ditindaklanjuti dengan melakukan pengujian komposit laminat dan membuat prototipe soket prosthesis atas lutut, melakukan pengujian statik dan dinamik untuk mengetahui kemampuan sebagai bahan alternatif soket prosthesis dan membandingkan dengan bahan komposit serat sintetik yang biasa digunakan sebagai bahan *prosthetics* dan *orthotics*.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa komposit lamina serat rami epoksi berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif dalam pembuatan soket prosthesis atas lutut pada fraksi volume serat 40-50%. Karakteristik mekanik komposit lamina serat rami epoksi longitudinal pada fraksi volume serat 40% yaitu tegangan tarik 232 MPa dan modulus elastisitas 9,7 GPa, sedangkan pada fraksi volume serat 50% tegangan tarik 260 MPa dan modulus elastisitas 11,23 GPa. Harga ini masih lebih besar dibandingkan dengan harga referensi pada penelitian ini, yaitu bahan polimer yang diaplikasikan di bidang kesehatan dengan harga minimal kekuatan tarik 80 MPa dan modulus elastisitas 3 GPa. Modus kegagalan yang terjadi pada komposit lamina rami epoksi meliputi *brittle failure* (getas) untuk fraksi volume serat 10-30%, debonding dan delaminasi fraksi volume serat 40-50%. Karakteristik mekanik komposit lamina rami epoksi memenuhi persyaratan sebagai bahan soket prosthesis, mengacu pada Standard ISO: *plastic/polymer for health application*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DRPM Universitas Indonesia yang telah membiayai penelitian ini dengan Kontrak No. 242G/DRPM-UI/N1.4/2008.

Daftar Acuan

- [1] G. Stark, JPO 17/4S (2005) 18-22.
- [2] H. van der Linde, J.H. Cheriell, A.C.H. Geurts, JRRD 41/4 (2004) 555-570.
- [3] W.C.C. Lee, Z. Ming, A.B. David, C. Bill, JRRD 41/6A. (2004) 775-786.
- [4] F. Prince, A.W. David, S. Gary, P. Corrie, K.W. Robyn, JRRD 35/2 (1998) 177-185.
- [5] S.L. Phillips, W. Craelius, JPO 17/1 (2005) 27-32.
- [6] J.A. Campbell, Engineering Material, Department Engineering, ANU, Canberra, 2002.
- [7] F.G. Torres, R.M. Diaz, Polymers & Polymer Composites 12/8 (2004) 705-718
- [8] John Craig, JPO 17/4S (2005) 27-49.
- [9] H. Ling-Ping, T. Yong, W. Lu-Lin., Advanced Materials Research 41-42 (2008) 313-316.
- [10] J.W. Kaczmar, J. Pach, R. Kozlowski, International Polymer Science and Technology 34/6 (2007) T/45-T/50.
- [11] J. Biagiotti, D. Puglia, L. Torre, J.M. Kenny, Polymer Composites 25/5 (2004) 470-479.
- [12] M. Jacob, B. Francis, S. Thomas, K.T. Varughese, Polimer Composites (2006) 671-680.
- [13] S. Panthapulakkal, S. Law, M. Sain, R. Perrinaud, R. Shermet, Composites in Manufacturing 22/4 (2006).
- [14] A. Saidah, Tesis Magister Teknik, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Indonesia, 2004.
- [15] D. Yulianto, Tesis Magister Teknik, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Indonesia, 2004.
- [16] K. Diharjo, S.H. Nuri, Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin, Universitas Petra, Surabaya, Indonesia, 2006.
- [17] K. Diharjo, Jurnal Teknik Mesin 8/1 April, Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia, (2006) 8-13.
- [18] ASTM, Annual Book of ASTM Standard, West Conshohocken, 2003.
- [19] A.K. Kaw, CRC Press, Boca Raton, New York, 1997.
- [20] BS ISO 10328-3: 1996, Prosthetics, Structural Testing of Lower-Limb Prostheses, Principal Structural Tests, <http://www.iso.org>.