

Pengaruh Siklus Panas pada Komposit Limbah Plastik HDPE-Serat Cantula sebagai Bahan Material Alternatif Melalui Uji Mekanik

Teguh Wiyono¹, Sunaryo², Burhan Ibnu Muftadi³

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Pratama Mulia Surakarta
¹masgoeh@yahoo.com

^{2,3}Jurusan Teknik Otomotif, Politeknik Pratama Mulia Surakarta

ABSTRACT

This research is to determine the effect of thermal cycling on mechanical properties of such composites. Mechanical properties test in the tensile strength, bending strength and impact strength. Composite materials using HDPE powder as a cosmetic bottle waste cantula matrix and fibers as reinforcement, fiber volume fraction is 40% composed of random. Specimens were made using a hot molding machine. Temperature thermal cycle with a variation of 60 ° C, 70 ° C, 80 ° C, 90 ° C and 100 ° C. Variations in the number of cycles performed 100 times. Testing of mechanical properties of the composite tensile strength using ASTM standard 3039, bending strength ASTM D 6272 standard, and impact strength testing with ASTM D 5941. Results of testing the mechanical properties of composites obtained the data that the composite thermal cycle with a temperature of 60 ° C were carried out as many as 100 times. The tensile strength of 26 MPa, bending strength of 29 MPa and impact strength 45 kJ/m². Composites with a thermal treatment at temperatures above 70 ° C resulted in the degradation of the material so that the mechanical strength decreases.

Keywords: HDPE waste, fiber cantula, polymer composite

I. LATAR BELAKANG MASALAH

Perkembangan teknologi bahan sekarang semakin pesat, akan kebutuhan material dengan beragam sifat dan kegunaannya meningkat. Jenis material tunggal tidak dapat memenuhi kebutuhan material yang mempunyai sifat dan kegunaan tertentu. Sebagai solusinya para peneliti di bidang material membuat material komposit dengan cara menggabungkan dua atau lebih material yang berbeda pada skala makroskopik untuk menghasilkan material yang memiliki kekuatan lebih tinggi dari material penyusunnya. Penggunaan serat alam sebagai serat penguat pada bahan komposit mulai banyak dikembangkan, karena komposit serat alam mempunyai banyak keunggulan yaitu murah, ringan dan bahan serat tersedia melimpah. Pemanfaatan serat *Agave*

cantula Roxb sebagai penguat pada limbah *High-density polyethylene (HDPE)* perlu diteliti, karena serat alam jenis ini banyak tumbuh di lereng pegunungan terutama di Indonesia. Jenis serat cantula ini memiliki serat yang panjang, harganya murah dan memiliki kekuatan tarik yang cukup tinggi.

Komposit polimer saat ini bersaing dengan komposit matriks logam maupun keramik. Berbagai pemrosesan komposit terus dilakukan diarahkan ke sasaran produk yang banyak diminati. Sebagai contoh untuk bahan alternatif atau bahan pengganti material berbagai produk yang dihasilkan oleh industri, khususnya industri manufaktur. Selama ini umumnya menggunakan bahan polimer termoset tetapi karena sifatnya yang tidak bisa terurai dengan alam dan tidak bisa didaur ulang, maka dengan ini bahan polimer di alihkan memakai (HDPE) terutama yang dapat

didaur ulang. *High-density polyethylene* (HDPE) yang dipakai merupakan limbah plastik yang tersedia melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal, ini merupakan salah satu polimer terbesar yang diproduksi guna kebutuhan rumah tangga maupun industri. Selain ringan, mudah dibentuk, cukup keras, tahan goresan dan dapat didaur ulang, tetapi pada proses pencetakannya perlu membutuhkan panas.

Penggunaan komposit polimer antara serat cantula dengan limbah HDPE yang akan diteliti ini dalam penerapannya, akan mengalami berbagai macam perlakuan dari lingkungan, seperti halnya beban termal. Beban termal dapat timbul dari perbedaan temperatur, atau sumber panas lain seperti kebakaran, panas dari listrik, atau mesin. Beban termal dapat terjadi berulang-ulang hingga terjadi siklus termal. Siklus termal tersebut menyebabkan bahan serat bisa terbakar atau menurun kekuatannya. Siklus termal sendiri dapat juga menyebabkan beban matriks menjadi getas atau retak. Perubahan sifat pada bahan serat dan beban matriks yang diakibatkan oleh pembebanan siklus termal menyebabkan perubahan sifat fisik dan mekanik pada komposit. Sehingga dalam penelitian ini perlunya dilakukan siklus termal dengan berulang-ulang diharapkan komposit tersebut dapat diketahui perubahan sifat mekanik terhadap kekuatan tarik, kekuatan *bending* dan impak pada komposit serat cantula sebagai penguat pada limbah HDPE yang didaur ulang. Penelitian ini guna mengetahui seberapa besar pengaruh dari siklus termal terhadap karakteristik material komposit serat cantula dan limbah HDPE yang didaur ulang terhadap terhadap sifat termal dan mekanik (kekuatan tarik, kekuatan *bending*, dan impak) pada material komposit tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Kajian teori

Perkembangan teknologi ternyata menyebabkan munculnya masalah baru, yaitu masalah lingkungan yang dapat mengganggu kehidupan manusia. Salah satu masalah

lingkungan yang mulai terasa dewasa ini adalah rusaknya lingkungan yang disebabkan banyaknya material yang tidak dapat dihancurkan oleh alam, oleh karena itu diperlukan material pengganti yang lebih ramah lingkungan. Material serat alam termasuk material yang ramah lingkungan, material ini dapat diuraikan oleh alam, serat memiliki kecenderungan untuk menghisap air, serat dapat diurai oleh alam dalam kondisi tertentu oleh bakteri/jamur. Di samping ramah lingkungan material serat alam mempunyai berbagai keunggulan yaitu harga murah,

Penelitian tentang komposit limbah HDPE dengan serat alam telah dilakukan Timothy dan Baillie (2007), pengaruh metode ekstrak serat *agave* dan limbah HDPE sebagai langit-langit atap menunjukkan bahwa serat dengan perlakuan panas sebelumnya akan meningkatkan kekuatannya dibanding dengan serat yang tidak mengalami perlakuan apapun sebelumnya. Penelitian mengenai siklus panas dalam waktu yang lama antara *fiberglass* dan *epoxy* dengan siklus temperatur 27 °C dan temperatur puncak 50 °C, dengan pengulangan 6, 12, 24, 36, dan 48 kali ditahan dalam waktu 5 menit menunjukkan bahwa lamanya waktu pada temperatur tinggi akan mengakibatkan rusaknya ikatan antar muka antara penguat dan matriks sehingga menyebabkan turunnya kekuatan komposit (Papanicolaou dan Xepapadaki 2009), kekuatan mekanik matriks HDPE dengan fraksi volume 5, 10, 20, 30, dan 40% partikel tanah liat dan ban karet ditekan dengan tekanan 10 MPa pada suhu 190 °C selama 10 menit menunjukkan penurunan kekuatan mekaniknya (Avila dan Fajula 2009).

1) Komposit

Komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih unsur material yang berbeda bentuk, sifat dan komposisinya sehingga diperoleh suatu material baru dengan sifat-sifat yang lebih baik atau tidak dimiliki oleh material penyusunnya. Material komposit merupakan suatu sistem material terbentuk dari campuran atau kombinasi dua bahan penyusun atau lebih yang satu sebagai pengisi atau penguat dan yang lain sebagai

pengikat. Material penyusun komposit tersebut mempunyai sifat-sifat yang berbeda dan ketika sudah digabungkan maka akan mempunyai sifat baru yang berbeda dengan sifat penyusunnya.

2) Limbah *High Density Polyethylene* (HDPE)

Produksi bahan *polimer* mentah dan mengubahnya menjadi barang jadi merupakan kegiatan industri plastik. Industri ini terkait dengan industri lainnya yaitu industri mesin dan kimia yang menghasilkan peralatan dan bahan yang diperlukan untuk memproduksi dan mengubah *polimer*. Di samping itu terkait pula pada industri pemakai komponen yang terbuat dari bahan plastik, seperti misalnya industri motor dan alat listrik (Mengeloglu dan Karakus 2008).

3) Serat *cantula*

Serat *cantula* merupakan serat alam sebagai hasil dari ekstraksi daun tanaman *Agave cantula Roxb* yang termasuk dalam keluarga *Agavaceae*. Tanaman *Agave cantula* yang memiliki nama lain *Agave candalabrum*, *Agave rumphii* maupun *Manila maguey* ini banyak tumbuh di daerah tropis, baik di Asia, Afrika maupun Amerika. Sebagaimana tanaman sejenisnya dalam keluarga *agavaceae*, *agave cantula* tidak memiliki batang yang jelas, dan memiliki daun yang kaku dengan panjang 100-175 cm dengan duri di sepanjang tepi daunnya. Serat *cantula* memiliki kandungan selulosa yang cukup tinggi, yakni 64,23%, hal ini menunjukkan bahwa serat ini berpotensi sebagai bahan penguat komposit polimer.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat penelitian

Penelitian dilakukan di laboratorium material Jurusan Teknik Mesin Politeknik Pratama Mulia Surakarta.

B. Bahan penelitian

1) Limbah *High Density Polyethylene* (HDPE)

Limbah HDPE didapatkan dari CV. Vanila Plastik, Jl. Raya Gawok Kluyon, Desa Waru, Kec. Gatak, Sukoharjo. Limbah HDPE dari limbah

kosmetik merk tertentu, di buat menjadi serbuk menggunakan mesin *chusing*, kemudian diayak menjadi *mesh* 20-40. Proses penggilingan limbah HDPE dilakukan di lab Teknik Mesin Politama Surakarta.

2) Serat *cantula*

Serat *cantula* didapatkan dari Koperasi Rami Kencono, Desa Sidomulyo, Kecamatan Pengasih, Kabupaten Kulonprogo. Serat sebelum digunakan terlebih dahulu diberi perlakuan dengan cara dipanaskan dengan mesin oven suhu 110 °C selama 45 menit, serat dipotong dengan panjang 300 mm, serat dalam komposit adalah tersusun secara acak kemudian di *hotpress* tekanan 30 bar, suhu 120 °C selama 20 menit, yang berbentuk lembaran tebal 1-1.5 mm.

C. Prosedur penelitian

1) Tahap Pembuatan Spesimen.

Spesimen benda uji dibuat dengan tahapan sebagai berikut :

2) Penyiapan bahan limbah HDPE.

Limbah plastik HDPE menggunakan jenis limbah botol kosmetik yang dipotong-potong ±10 mm kemudian dicuci dengan air bersih dan di keringkan di bawah sinar matahari. HDPE digiling dengan mesin *crushing* dan diayak untuk mendapatkan *mesh* 20-40.

3) Penyiapan serat *cantula*.

Serat *cantula* dicuci dan dikeringkan di bawah sinar matahari. Serat *cantula* di potong-potong panjang 300 mm dan di-oven temperatur 110 °C selama 45 menit. Peng-oven-an serat *cantula* bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa dalam serat, kemudian dibentuk dalam lembaran tebal 1-1.5 mm ditekan memakai mesin *hot-press* tekanan 30 bar, suhu 120 °C selama 20 menit.

D. Proses pembuatan komposit

Pada cetakan komposit ditaburi serbuk Limbah HDPE kemudian serat *cantula* yang berbentuk lembaran ditaruh di atasnya kemudian ditaburi serbuk limbah HDPE lagi sesuai dengan komposisi yang takar dibuat dengan cara *hand lay up* kemudian dicetak dengan proses *casting*

dalam mesin *hot-press* pada temperatur 150 °C dan tekanan 30 bar selama 10 menit. Titik cair limbah HDPE adalah 130 °C Spesimen komposit dicetak sesuai standar uji tarik ASTM D 638, uji *bending* standar ASTM D 6272 dan uji impak standar ASTM D 5941.

E. Tahap pengujian

1) Pengujian siklus termal

Dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik berupa kekuatan tarik, kekuatan *bending* dan kekuatan impak, perubahan sifat pada bahan serat maupun matriks yang diakibatkan oleh pembebanan siklus termal, dimungkinkan menyebabkan perubahan sifat mekanik pada komposit.

2) Pengujian tarik

Uji tarik adalah pemberian gaya atau tegangan tarik kepada material dengan maksud untuk mengetahui atau mendeteksi kekuatan dari suatu material. Tegangan tarik yang digunakan adalah tegangan aktual *eksternal* atau perpanjangan sumbu benda uji. Uji tarik dilakukan dengan cara penarikan uji dengan gaya tarik secara terus menerus, sehingga bahan (perpajangannya) terus menerus meningkat dan teratur sampai putus. Pengujian menggunakan ASTM D 638 Dimensi benda uji yaitu panjang (165) mm, lebar (19±0,2) mm dan tebal (3.2±0,2) mm.

3) Pengujian *bending*

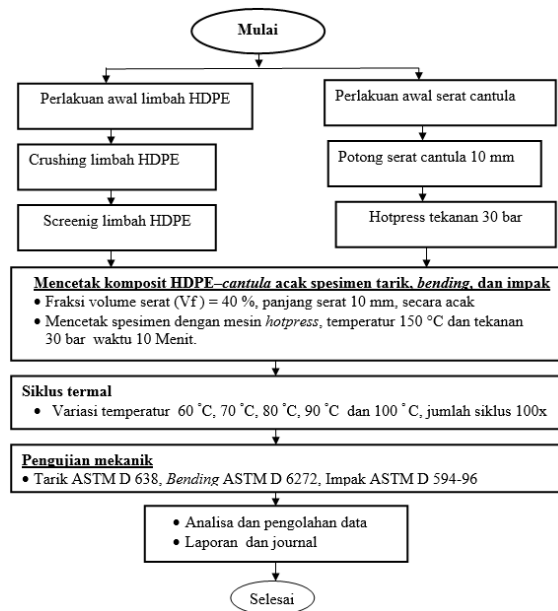
Pengujian kekuatan *bending* ini memakai metode *four point bending*. Standar pengujian untuk mengetahui kekuatan lentur (sifat-sifat lentur) material plastik menggunakan ASTM D 6272. Dimensi benda uji yaitu panjang (127) mm, lebar (12,7±0,2) mm dan tebal (3,2±0,2) mm. Pengujian menggunakan *universal testing machine*.

4) Pengujian kekuatan impak.

Standar pengujian impak untuk material plastik adalah dengan menggunakan ASTM D 5941. Dimensi benda uji untuk pengujian impak adalah berbentuk persegi dengan standar ukuran adalah panjang 80±2 mm, lebar 10,0 ± 0,2 mm, tebal 4,0±0,2 mm. Kekuatan impak di hitung dari

energi tumbukan dibagi dengan luas penampang spesimen, dengan satuan kJ/mm².

F. Skema penelitian



Gambar 1. Skema penelitian

G. Indikator capaian

Penelitian ini merupakan tahapan inovasi pemanfaatan limbah (HDPE) tak berguna menjadi rancangan produk panel dengan nilai teknologi dan ekonomi tinggi. Proses alih teknologi dilakukan dengan merekayasa proses manufaktur komposit dengan mengombinasikan metode *hand lay up* dan *press mold*. Hasil penelitian ini akan mampu menggantikan material serat gelas sintesis impor yang lebih mahal dan tidak ramah lingkungan. Riset ini potensial dikembangkan menjadi riset kerja sama dengan industri agar kontribusinya semakin luas, seperti mengurangi ketergantungan material impor, menanamkan kemandirian melakukan inovasi iptek, meningkatkan kandungan material lokal, serta menaikkan nilai ekonomi limbah plastik (HDPE) dan serat cantula. Hasil penelitian ini akan menghasilkan *prototype* lembar material komposit, limbah HDPE-serat cantula serta jurnal akan dipublikasikan di majalah ilmiah terakreditasi yang disebarluaskan secara Nasional

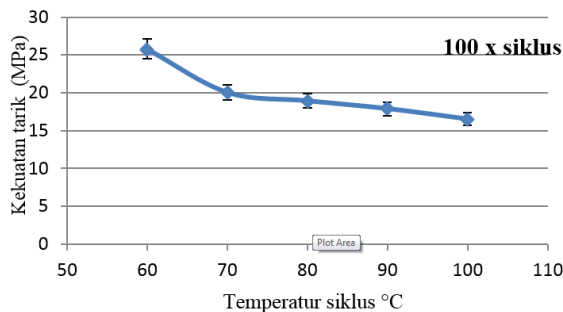
berusaha dimasukkan pada jurnal International pula sebagai informasi perkembangan teknologi komposit yang potensial untuk diterapkan di industri karoseri seperti lantai dasar bodi mobil dan panel interior kendaraan bermotor.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Variasi temperatur siklus terhadap sifat mekanik komposit limbah HDPE-serat cantula

1) Kekuatan tarik

Kekuatan tarik cenderung menurun dengan peningkatan temperatur siklus, kekuatan tarik tertinggi sebesar 26 MPa terjadi pada temperatur siklus 60 °C.



Gambar 2. Kekuatan tarik komposit limbah HDPE-serat cantula

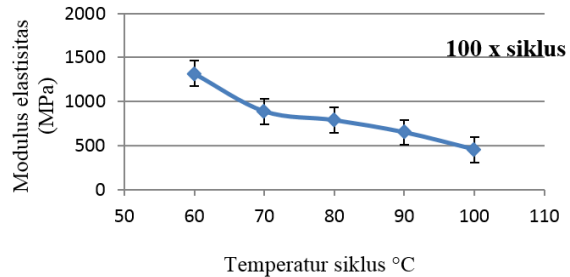
Tabel 1. Penurunan kekuatan tarik komposit limbah HDPE-serat cantula

No	Temperatur	Kekuatan tarik	Penurunan
1	60 °C	26 MPa	
2	70 °C	20 MPa	23,07%
3	80 °C	19 MPa	26,92%
4	90 °C	18 MPa	30,76%
5	100 °C	17 MPa	34,61%

Perlakuan siklus termal mengakibatkan turunnya kekuatan tarik karena semakin tinggi temperatur yang diberikan berpengaruh terhadap sifat HDPE.

Hal ini disebabkan karena pada saat proses siklus termal, terjadi penggeseran ikatan antar muka antara limbah HDPE dan serat cantula, sehingga akan menimbulkan celah pada komposit,

ini merupakan awal terbentuknya retakan. Penggeseran pada waktu siklus terjadi karena koefisien muai antara limbah HDPE-serat berbeda (Avila dan Fajula 2009), sehingga lama kelamaan serat cantula akan terlepas dari limbah HDPE yang menyebabkan kekuatan tarik dari komposit berkurang.



Gambar 3. Modulus elastisitas komposit limbah HDPE-serat cantula

Tabel 2. Penurunan modulus elastisitas komposit limbah HDPE-serat cantula

No	Temperatur	Modulus elastisitas	Penurunan
1	60 °C	1317 MPa	
2	70 °C	889 MPa	32,52%
3	80 °C	788 MPa	40,16%
4	90 °C	650 MPa	50,64%
5	100 °C	455 MPa	65,45%

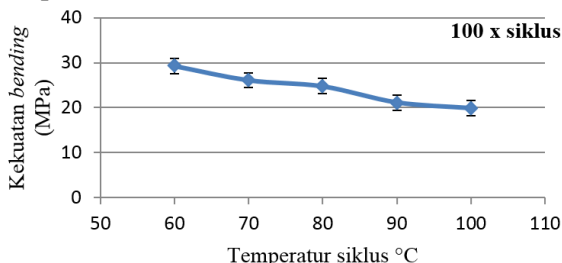
Nilai modulus elastisitas komposit sebanding dengan kekuatan tariknya. Modulus elastisitas tertinggi sebesar 1317 MPa terjadi pada temperatur siklus 60 °C. Modulus elastisitas memiliki kecenderungan menurun disebabkan dengan bertambahnya temperatur siklus maka terjadi perubahan sifat pada HDPE akan menjadi lunak terus mengeras lagi maka terjadi pemutusan silang antara limbah HDPE-serat cantula, sehingga mengakibatkan modulus elastisitas komposit menurun (Onal dan Karaduman, 2009).

2) Kekuatan bending

Hasil uji bending disajikan dalam bentuk grafik seperti terlihat pada Gambar 4.

Kekuatan bending semakin turun dengan bertambahnya temperatur. Kekuatan bending tertinggi 29 MPa. terjadi pada temperatur 60 °C. Penurunan kekuatan HDPE terjadi pada temperatur antara 60 °C sampai 80 °C

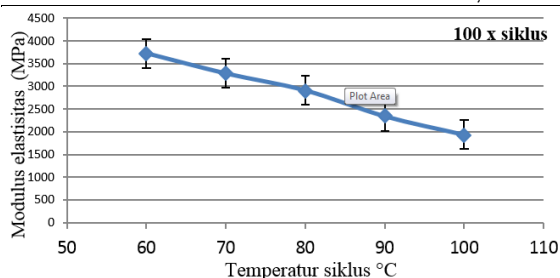
(Martienssen dan Warlimont 2005). Maka siklus dengan temperatur 80 °C material HDPE sudah memasuki fase perubahan bentuk. dari fase padat ke cair yang mengakibatkan ikatan antar muka antara HDPE dan serat *cantula* menjadi melemah, kondisi seperti ini sesuai dengan penelitian (Papanicolaou 2009).



Gambar 4. Kekuatan bending komposit limbah HDPE-serat cantula

Tabel 3.. Penurunan kekuatan bending komposit limbah HDPE-serat cantula

No	Temperatur	Kekuatan bending	Penurunan
1	60 °C	29 MPa	
2	70 °C	26 MPa	10,34%
3	80 °C	25 MPa	13,79%
4	90 °C	21 MPa	27,58%
5	100 °C	20 MPa	31,03%



Gambar 5. Modulus elastisitas bending komposit limbah HDPE-serat cantula

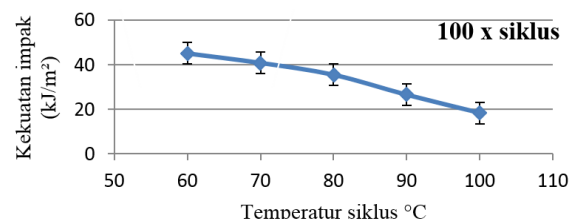
Tabel 4. Penurunan modulus elastisitas bending komposit limbah HDPE-serat cantula

No	Temperatur	Modulus elastisitas	Penurunan
1	60 °C	3726 MPa	
2	70 °C	3283 MPa	11,88%
3	80 °C	2911 MPa	21,87%
4	90 °C	2344 MPa	37,09%
5	100 °C	1937 MPa	48,01%

Turunnya kekuatan *bending* terjadi karena timbulnya celah yang disebabkan terlepasnya ikatan antara limbah HDPE dan serat cantula yang menyebabkan luasan spesimen yang menerima gaya semakin kecil. Pengaruh perlakuan panas kejut (*thermal shock*) terhadap GFRP komposit dengan menggunakan matrik *unsaturated polyester* dan *epoxy*, kegagalan *debonding* pada matriks karena pengaruh *thermal fatigue*, penelitian (Surdia 2010) waktu dan temperatur tinggi dapat menjadi penyebab menurunnya kekuatan polimer, polimer dalam waktu yang singkat pada temperatur yang lebih tinggi akan memberikan pengaruh kerusakan.

3) Kekuatan impact

Hasil pengujian kekuatan impact komposit limbah HDPE-serat *cantula* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kekuatan impact komposit limbah HDPE-serat cantula

Tabel 5. Penurunan kekuatan impact komposit limbah HDPE-serat cantula

No	Temperatur	Kekuatan impact	Penurunan
1	60 °C	45 kJ/m²	
2	70 °C	41 kJ/m²	8,88%
3	80 °C	36 kJ/m²	20,00%
4	90 °C	27 kJ/m²	40,00%
5	100 °C	18 kJ/m²	60,00%

Kekuatan impact mengalami penurunan dengan bertambahnya temperatur siklus. Kekuatan impact tertinggi 45 kJ/m² terjadi pada temperatur siklus 60 °C. Semakin tinggi variasi temperatur yang diberikan akan semakin memperlemah ikatan antar muka (Seuck dan Lim 2011).

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari analisa data, maka dapat disimpulkan sebagai berikut

1. Hasil penelitian menunjukkan keseluruhan nilai kekuatan mekanik meliputi uji tarik, uji *bending*, dan uji impak komposit limbah HDPE-serat cantula mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya temperatur dan jumlah siklus yang diberikan. Penurunan kekuatan mekanik komposit terbesar pada variasi temperatur 100 °C dan variasi siklus 300.
2. Pada variasi temperatur siklus termal, penurunan nilai kekuatan mekanik terbesar terjadi pada uji tarik, uji *bending*, dan uji impak pada suhu 100 °C, sedangkan untuk variasi jumlah siklus termal penurunan nilai kekuatan mekanik terbesar terjadi pada jumlah siklus 300.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai variasi temperatur dan jumlah siklus termal terhadap sifat mekanik dan termal komposit HDPE-serat *cantula*, penulis menyarankan

1. Untuk meningkatkan hasil yang lebih baik di bidang material komposit yang memanfaatkan bahan limbah plastik dan serat alam, sebaiknya serat alam sebelum digunakan sebagai penguat diberi perlakuan dengan seperti Na OH maupun oven.
2. Untuk perlakuan Na OH pada serat supaya permukaan kasar sehingga nantinya diharapkan terjadi ikatan yang baik dan kuat antara matriks dan penguat serat.
3. Untuk penelitian selanjutnya supaya kekuatan mekanik meliputi uji tarik, uji *bending*, dan uji impak dapat meningkat sebaiknya ukuran partikel lebih kecil dari *mesh* 40-60, dan suhu operasi diharapkan di bawah dari suhu distorsi untuk bahan ini suhu operasi disarankan di bawah 80 °C.

REFERENSI

- Azwa, Z.N., Yousif A.C., Manalo, W., Karunasena. 2013. *a Review the Degradability of Polymeric Composites Based on Natural Fibers*, Centre of excellence in Enginered fibre cposites (CEEFC), Faculty of Engenering and surveying university of Sounten Quesland Toowomba 4350 QLD, Australia.
- Farzana, H.S., Mehdi, H.J. 2006. *Polymer-Matrix Nanocomposites, Rocessing, Manufacturing, and Application: an Overview*, Aerospace Manufacturing Technology Center (AMTC) Institute for Aerospace Research (IAR), National Research Council Canada (NRC), Montreal, QC, Canada.
- Gibson, O.F. 1994. *Principles of Composite Material Mechanics*. McGraw Hill International Editional Editions, USA.
- Jain, R., and Lee, L. 2012. *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Springer Science Business Media B.V. Composites for Infrastructure 23 Applications, Strategies for Sustainability*, DOI 10.1007/978-94-007-2357.
- Mengeloglu, F.T., Kadir, K. 2008. *Thermal Degradation, Mechanical Properties and Morphology of Wheat Straw Flour Fillet Recycled Thermoplastic Composites*, Journal, Sensors.
- Nourbakhsh, A., Alireza, A. 2009. *Preparation and Properties of Wood Plastic Composites Made of Recycled High-Density Polyethylene*, *Journal of composite material*. Published 4 March 2009, DOI: 10.1177/002199830910389, SAGE Publications.
- Onal, L., Karaduman, Y. 2009. *Mechanical Characterization of Carpet Waste Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites*, Departemen of tekstile Engineering, Erciyes University , Kayseri, Turkey.
- Papanicolaou, G.C. Xepapadaki, G.D. Tagaris. 2009. *Effect of Thermal Shock Cycling on the Creep Behavior of Glass-Epoxy Composite*, Composites Material Group, Department of Mechanical and Aeronautical engineering, University of Patras, Greece.
- Palmer, J., Ghita, O.R., Savage, K.E. 2009. *Successful Close-Loop Recycling of Thermoset Composites*, School of Engineering Computing and

Mathematics, University of Exeter, North Park Road.

Pickering, S.J. 2006. *Recycling Technologies for Thermoset Composite*, School of Mechanical Material and manufacturing Engineering, The University of Nottingham, University Park, Nottingham.

Ribeiro, M.C.S., Meixedo, J.P., Fiusza, M.L., Dinis, A.C., Meira, C.F., Silva, C.C., Ferreira, M.R. 2011. *Mechanical Behaviour Analysis of Polyester Polymer Mortars Modified with Recycled GFRS Waste Materials*, Faculty of Engineering of University of Porto, Portugal.