

HIBRIDISASI: MENINGKATKAN SIFAT LENGKUNG MATERIAL KOMPOSIT

MONOGRAF

Sudarisman

Dosen Program Studi Teknik Mesin

Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

2018

HIBRIDISASI: MENINGKATKAN SIFAT LENGKUNG MATERIAL KOMPOSIT

©SUDARISMAN

Katalog Dalam Terbitan (KDT)

Perpustakaan Nasional Republik Indonesia (PNRI)

ISBN :

Halaman :

Penulis : Sudarisman

Layout & Desain Cover :

Cetakan Pertama 2018

Diterbitkan Oleh :

Lembaga Penelitian Publikasi dan Pengabdian Masyarakat Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (LP3M UMY)

Dilarang mengcopy, memperbanyak tanpa seijin penerbit.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang.

PRAKATA

Alhamdulillahirabbil'aalamiin, segala puji hanya milik Allah Swt., Tuhan sekalian alam. Rasa syukur penulis panjatkan kepada Allah atas selesainya penulisan buku monograf yang berjudul **“HIBRIDISASI: MENINGKATKAN SIFAT LENGKUNG MATERIAL KOMPOSIT”**.

Walaupun memiliki sifat mekanis yang relatif rendah, komposit berserat alami memiliki masa daur ulang yang lebih pendek sehingga penggunaannya sebagai material untuk komponen atau struktur menggantikan komposit berserat sintetis makin meluas. Dalam buku ini disajikan teknik meningkatkan sifat lengkung material komposit berserat alami bermatrik polimer dengan cara substitusi parsial seratnya dengan serat sintetis, sehingga dihasilkan komposit berserat hibrid alami-sintetis bermatrik polimer. Peningkatan sifat-sifat lengkung tersebut, dianalisis dengan mengaitkannya dengan karakteristik patahannya. Dengan peningkatan sifat lengkung, misalnya suatu balok, akan diperoleh ukuran balok yang lebih kecil sehingga lebih menghemat pemakaian material dan struktur akan menjadi lebih ringan.

Terimakasih penulis sampaikan kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan rekan sejawat di Program Studi Teknik Mesin atas dorongan, masukan, dan bantuan yang telah diberikan. Terimakasih juga penulis sampaikan kepada anak-anak dan istri tercinta yang selalu menjadikan inspirasi bagi penulis. Penulis sadar bahwa buku ini belumlah sempurna, maka kritik dan saran yang konstruktif dari pembaca sangat diharapkan demi penyempurnaan buku ini. Penulis berharap semoga buku ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan material teknik guna menunjang tercapainya Indonesia yang berkemajuan.

Penulis,

Sudarisman

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Prakata	ii
Daftar Isi	iii

1. PENDAHULUAN

- 1.1. Material Konvensional
- 1.2. Material Komposit Sebagai Material Maju
 - 1.2.1. Material Komposit Diperkuat Serat Sintetis
 - 1.2.2. Material Komposit Diperkuat Serat Alami
- 1.3. Pencemaran Lingkungan

2. MATERIAL KOMPOSIT BERPENGUAT SERAT

- 2.1. Perkembangan Material Teknik
- 2.2. Material Komposit
- 2.3. Material Pengikat atau Matrik: Poliester dan Epoksi
- 2.4. Serat Sebagai Material Pengisi (*Filler*) dan Penguat
 - 2.4.1. Serat sintetis
 - 2.4.2. Serat alami
- 2.5. Antar Muka Serat-Matrik
- 2.6. Fabrikasi material Komposit Serat Bermatrik Termoset
 - 2.6.1. Susunan serat (*Fiber architecture*)

3. SIFAT-SIFAT MATERIAL KOMPOSIT

- 3.1. Kandungan Serat
- 3.2. Pembebanan Lengkung
 - 3.2.1. Hubungan Gaya Lateral-Defleksi
 - 3.2.2. Kuat Lengkung
 - 3.2.3. Regangan pada Tegangan Maksimum dan Regangan Patah

- 3.2.4. Modulus Elastisitas Lengkung
- 3.2.5. Kapasitas Penyerapan Energi
- 3.2.6. Moda Gagal
- 3.3. Karakterisasi

4. MATERIAL KOMPOSIT HIBRID

- 4.1. Material Komposit Hibrid Matrik
- 4.2. Material Komposit Hibrid Serat Alami/Gelas-E
- 4.3. Material Komposit Hibrid Serat Ijuk/Gelas-E

5. PENUTUP

- 5.1. Moda Gagal
- 5.2. Kuat Lengkung
- 5.3. Modulus Elastisitas Lengkung
- 5.4. Kapasitas Penyerapan Energi

DAFTAR PUSTAKA

PENDAHULUAN

1.1. Material Konvensional

Yang dimaksud dengan material konvensional adalah material yang sudah ditemukan dan digunakan sejak lama. Termasuk material konvensional misalnya dari kelompok logam dan paduannya, seperti logam fero dan non-fero dan paduannya. Dari kelompok polimer dan elastomer seperti karet alami, dan plastik tanpa penguat. Sedangkan dari kelompok keramik alami seperti batu, pasir dan kaca.

Material konvensional dari kelompok logam dan paduannya serta keramik pada umumnya bersifat isotropis yakni sifatnya tidak tergantung pada arah atau sudut pembebanannya. Sedangkan beberapa polimer atau elastomer bersifat anisotropis. Beberapa sifat fisis dan mekanis penting material konvensional ditunjukkan pada Tabel 1.1. Logam pada umumnya memiliki sifat mekanis yang lebih tinggi dibandingkan dengan kayu, bambu dan rotan sebagai komposit alami, seperti terlihat pada Tabel 1.1.

Selain itu, logam pada lingkungan yang lembab, atau berkadar asam, basa atau garam mudah teroksidasi. Logam juga memerlukan waktu yang relatif lama untuk terdegradasi secara alamiah, misalnya kaleng aluminium memerlukan lebih dari 1.000.000 tahun. Dari kelompok

polimer, seperti tas plastik memerlukan sekitar 20 tahun. Bahkan kelompok keramik dan kaca memerlukan waktu yang lebih lama lagi, bisa mencapai 2.000.000 tahun untuk terurai secara sempurna secara lamiah (Department of Environment and Conservation, 2018).

Tabel 1.1. Karakteristik material konvensional untuk matrik¹⁾

Material	Massa jenis [g/cm ³]	Kuat tarik(+) [MPa]	Modulus Young [GPa]	Poisson's ratio
Logam dan paduannya:				
Aluminium (Al)	2,71	74	69,0	0,32
Titanium (Ti)	4,51	238	113,8	0,33
Magnesium (Mg)	1,74	189	45,5	0,33
Polimer dan elastomer:				
Epoksi	1,54	60	3,5	0,33
Poliester	1,38	35	2,5	0,33
Poliamida (nilon)	1,36	100	2,5	-
Kemarik dan kaca:				
Kaca borosilikat	2,23	90	63,7	0,21
Alumina (Al ₂ O ₃) ²⁾	3,30-3,79	– (2000-4000)	260-410	0,22-0,27
Magnesia (MgO) ³⁾	3,54-3,58	83,3-166,7	270-330	0,35-0,37

²⁾(<http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/props.html>), diunduh: 21 Agustus 2018), ²⁾Auerkari, 1996, ³⁾Azo Materials, 2018.

1.2. Material Komposit Sebagai Material Maju Maju

Material maju adalah material yang karakteristiknya dapat dirancang sesuai dengan tuntutan kebutuhannya, baik dari segi pembebanan, responnya terhadap beban maupun kondisi lingkungan tempat pemakaiannya. Komposit terdiri atas material pengikat atau matrik, dan material pengisi yang kadang sekaligus berfungsi sebagai penguat. Termasuk dalam kelompok ini adalah komposit buatan (*man-made composites*). Pemilihan matrik pada umumnya ditentukan oleh faktor kinerja utama, berat maksimum produk, dan kondisi tempat pemakaian produk tersebut (Mansor dkk., 2014), sedangkan pemilihan

material pengisi atau *filler* dipilih untuk memperbaiki sifat matriknya lebih ditentukan oleh peningkatan sifat yang dimaksud dan jenis matrik yang telah dipilih. Material pengisi yang dipilih harus kompatibel dengan matriknya (Pan, 1993) sehingga terjadi pembasahan yang baik dan ikatan yang kokoh pada antarmuka *filler*-matrik. Sedangkan bentuk dan susunan seratnya lebih banyak ditentukan oleh karakteristik pembebanannya. Logam, polimer maupun keramik telah digunakan sebagai matrik.

Tabel 1.2. Karakteristik material komposit

Material	Massa jenis [g/cm ³]	Sifat Tarik		
		Kekuatan [MPa]	Modulus [GPa]	Regangan patah[%]
Komposit bermatrik logam, serat searah, sifat searah serat ¹⁾ :				
Grafit P100/6061 Al	2,50	905	342,5	-
Grafit P100/AZ91C Mg	1,97	710	323,8	-
Boron/Al	2,70	1100	325,0	-
Komposit bermatrik polimer, serat searah, sifat searah serat ²⁾ :				
Galss-E/epoksi ($V_f = 60\%$)	-	1020	45	-
Karbon/epoksi ($V_f = 60\%$)	-	1240	145	-
Aramid/epoksi ($V_f = 60\%$)	-	1380	76	-
Komposit bermatrik kemarkir, serat searah, sifat searah serat ³⁾ :				
Sylramic SiC/SiC ($V_f = 36\%$)	2,86	362	208	0,480
Karbon T300/SiC ($V_f = 45\%$)	2,10	485	57,9	1,230
CG Nicalon/Si ₃ N ₄ ($V_f = 45\%$)	2,20	251	93	0,043
Komposit berserat alami:				
Jute/ Poliester ($V_f = 36\%$) ⁴⁾	-	45,82	3,70	-
Bambu/epoksi ($V_f = \sim 30\%$) ⁵⁾	-	84,50	7,10	9,0
Sisal/poliester ⁶⁾	1,2	24,80	5,40	1,5

Catatan kaki untuk Tabel 2: ¹⁾(Rawal, 2001), ²⁾(Florea dan Carcea, 2012), ³⁾(Department of Defense, 2002), ⁴⁾(Ticoalu et al, 2010) , ⁵⁾(Sudarisman et al, 2015) , ⁶⁾(Silva et al, 2013).

Karakteristik beberapa contoh material komposit serat searah dengan berbagai jenis matrik ditunjukkan pada Tabel 1.2 di atas.

1.3. Pencemaran Lingkungan

Serat sintetis dikenal memiliki sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan serat alami (Misnon dkk., 2014), sehingga pemakaiannya sebagai pengisi dan penguat material komposit sangatlah luas. Namun demikian, serat sintetis memerlukan waktu yang lebih lama untuk terurai secara alamiah (Begum dan Islam, 2013), sehingga produk komposit bekas pakai yang menggunakan serat sintetis dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Karena pertimbangan hal-hal tersebut, sejak beberapa dekade terakhir ini serat alami makin banyak digunakan untuk substitusi serat sintetis karena beberapa kelebihan yang dimiliki antara lain (Golbabaie, 2006) murah, memiliki kekuatan yang memadai, ringan, pemrosesannya relatif fleksibel, tahan korosi, biodegradabel dan tidak bersifat iritatif.

Li dkk.(2010) melaporkan bahwa serat poliester terdegradasi lebih lambat dibandingkan dengan serat kapas. Dengan penambahan cairan pelembut (*softener*), serat kapas bahkan terdegradasi lebih cepat lagi. Sementara itu Arshad dan Mujahid (2011) melaporkan tentang masa degradasi serat alami dari tumbuhan maupun hewan, baik yang berupa selulosa maupun bukan selulosa, dan juga serat sintetis di dalam tanah. Ditemukan bahwa jute dan linen terdegradasi paling cepat, wol lebih lama untuk terdegradasi, sedangkan untuk serat poliester tak teramati karena demikian lambatnya.

Karena pemakaiannya yang semakin meluas dan masa peluruhannya secara alami yang memerlukan waktu yang lama dibandingkan dengan serat alami, maka komposit yang diperkuat dengan serat sintetis disamping kelebihannya yang berujung kerja tinggi, potensial menimbulkan permasalahan pencemaran lingkungan karena produk pascapakainya yang tertimbun di lingkungan. Sementara itu terdapat potensi serat alami yang cukup besar yang dapat digunakan sebagai substitusi terhadap pemakaian serat sintetis guna mengurangi masa peluruhan secara alamiah produk bekas pakainya.

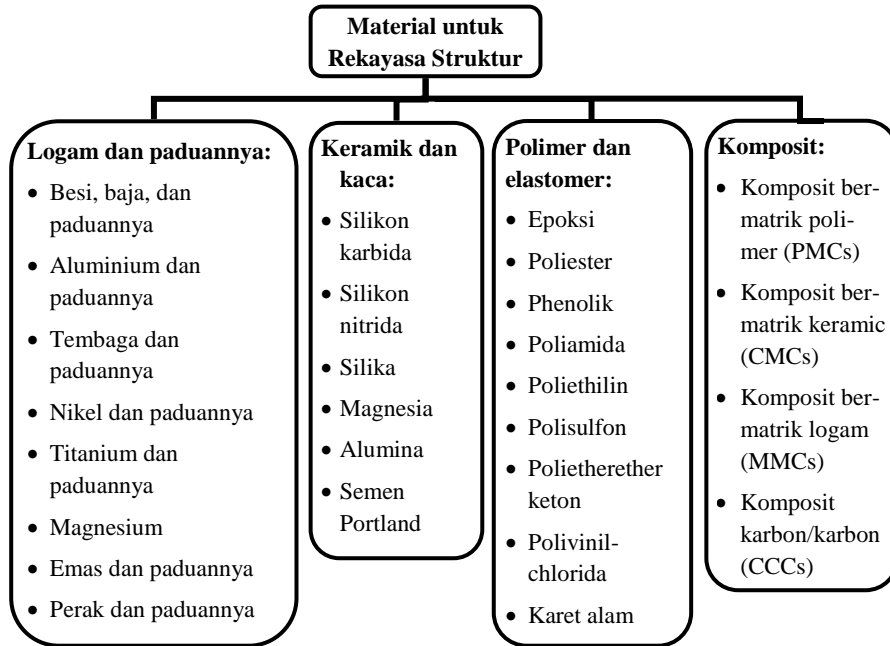
MATERIAL KOMPOSIT BERPENGUAT SERAT

2.1. Perkembangan Material Teknik

Dalam pengertian yang luas, material teknik sangatlah beragam yang dapat berupa padat, cair maupun gas. Namun demikian, material teknik untuk rekayasa struktur hampir semuanya dalam bentuk padat. Berdasar pada kemiripan, prosedur pengolahan, struktur mikro, sifat dan aplikasinya, material untuk rekayasa struktur dapat diklasifikasikan menjadi empat kelompok, yakni, logam dan paduannya, keramik dan kaca, polimer dan elastomer, serta komposit, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.

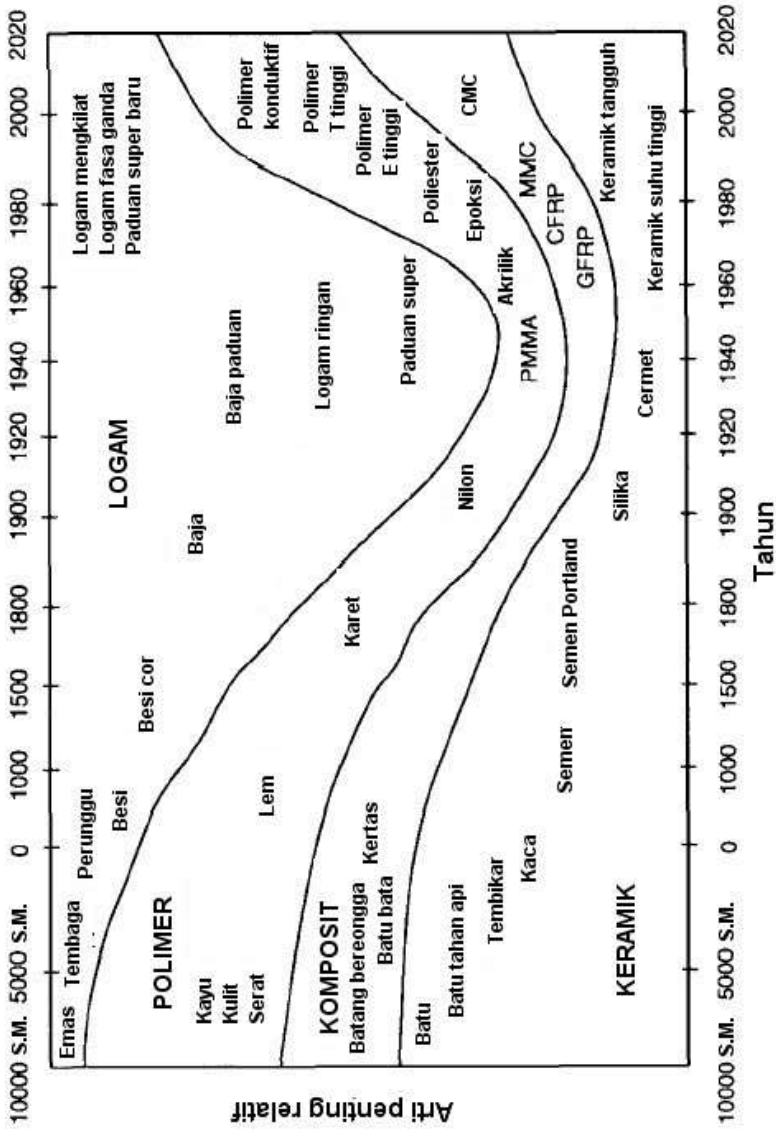
Perkembangan peradaban manusia menunjukkan bahwa perkembangan jenis material yang digunakan pada suatu masa tertentu berkaitan erat dengan kemajuan peradaban pada masa tersebut. Kemajuan dalam pengembangan material terutama dipicu oleh kebutuhan akan material bermutu tinggi untuk keperluan persenjataan (Ashby, 2011). Perkembangan tersebut dapat dilacak sejak masa prasejarah melalui

berbagai literatur (Ashby, 2010; Derry dan Williams, 1970; Tylecote, 1992), yang dirangkum seperti pada Gambar 2.1. Pada zaman batu sampai 10.000 tahun sebelum masehi, sebagian besar peralatan terbuat dari batu yang merupakan salah satu keluarga keramik.



Gambar 2.1. Ringkasan pengelompokan material untuk rekayasa struktur (Sudarisman, 2009; dirangkum dari Ashby, 2011; Ashby dan Jones, 2000; Mazumdar, 2002)

Pada zaman perunggu antara 4.000 – 1.000 tahun sebelum masehi, tembaga dan perunggu ditemukan sehingga peralatan yang terbuat dari kedua jenis logam inipun berkembang dengan pesat. Peralatan seperti linggis, pisau dan belati, hiasan dan berbagai ornamen terbuat dari tembaga (Cu) dengan kandungan 0,5% - 3,0% timah (Sn) dan sampai 1,5% arsen (As) yang diperkirakan dibuat antara 1800– 3900 tahun sebelum masehi ditemukan di Mesir, India, Irak, dan Turki (Tylecote, 1992). Selain itu, berbagai ornamen, pedang, tombak, mata panah, dan senjata bertahun sekitar 1300 sebelum masehi ditemukan di Mesir, yang teknik pembuatannya dengan penempaan, kecuali mata panah yang dibuat dengan pengecoran.



Gambar 2.2. Perkembangan material untuk rekayasa struktur (Sударisman, 2009, digambar ulang dari Ashby, 2011)

Pada zaman besi, antara tahun 15000 sebelum masehi sampai sekitar 1620 masehi, dengan ditemukannya besi maka senjata dan peralatan yang tadinya dibuat dari perunggu digantikan oleh besi. Pembuatan senjata dari besi di Anatolia dan Iran dapat ditemukan antara tahun 1500 sampai 1000 sebelum masehi. Menurut sejarah, besi sampai di Asia, Afrika utara dan Eropa pada sekitar tahun 1000 sampai 500 sebelum masehi, sampai di Yunani pada sekitar tahun 900 sebelum masehi, dan sampai di Sudan pada sekitar tahun 200 sebelum masehi.

Seiring dengan ditemukannya teknik produksi logam, seperti pengecoran logam pada sekitar tahun 1620, pengaturan kadar karbon dalam logam fero yang menghasilkan berbagai macam besi dan baja pada sekitar tahun 1850, beserta berbagai macam logam paduan yang ringan pada sekitar tahun 1940, pada masa berikutnya logam memegang peranan penting dan sentral sebagai material untuk berbagai struktur dan material teknik pada umumnya. Karena kekuatan dan kekakuannya yang tinggi, pemakaian logam mencapai puncaknya pada sekitar 1960-an (Ashby, 2011), sementara itu pemakaian polimer dan elastomer serta keramik dan kaca makin berkurang akibat teknik produksi yang ada pada masa itu tidak mendukung sehingga diperoleh produk yang berunjuk kerja rendah. Sejak dekade 1910-an material komposit buatan sebenarnya telah mulai dikenal dan digunakan (Megson, 1972).

Pada masa Perang Dunia ke-2, rangka dan dingsing sayap pesawat terbang dibuat dari kayu, yang merupakan komposit alami, dan kain yang dibungkuskan pada rangka sayapnya dan kemudian dibasahi dengan resin. Beberapa pesawat terbang generasi awal yang menggunakan kayu sebagai strukturnya anatara lain Monocaque Deperdussin yang dibuat pada tahun 1912 dan Lockheed Vega yang dibuat tahun 1927, De Havilland Mosquito milik British Royal Air Force (Megson, 1972;Seng, 1998), Pesawat pembom Rusia I1-4, I1-2 (Alexander, 1975), juga pesawat terbang buatan Jepang (Fukuda, 1999).

Mulai berkembang pesatnya industri otomotif dan pesawat terbang pada dekade 1960-an, kebutuhan akan material dengan kekuatan spesifik (kekuatan per satuan massa) dan kekakuan spesifik (kekakuan per satuan massa) yang tinggi, menyebabkan komposit modern berkembang pesat (Chawla, 1987). Dapat dilihat pada Gambar 2.2 bahwa pada tahun 2020 diperkirakan komposit material akan memiliki arti yang sangat penting sebagaimana keramik dan polimer, yang bahkan melebihi logam. Pemakaian material komposit diperkirakan mencakup berbagai bidang, baik sipil maupun militer, luar angkasa, maritim, dan otomotif.

2.2. Material Komposit

Material komposit dapat didefinisikan sebagai material yang terbentuk dari dua atau lebih penyusun, yang disebut bahan pengikat atau matrik dan bahan pengisi atau penguat, yang memiliki karakteristik yang berbeda dengan bahan-bahan pembentuknya (Agarwal dkk., 2018; Matthews, 2000), pembentukan tersebut secara makroskopis dengan antarmuka serat-matrik yang jelas (Reinhardt dan Clements, 1989) dan masih dapat dikenali (Weeton dkk., 1990).

Komposit banyak dikembangkan karena sifat-sifatnya dapat didesain sesuai dengan keperluannya dengan memilih kombinasi material pengisi atau penguat dan matrik yang tepat, (Agarwal dkk., 2018), yang tidak didapat pada material lain. Keunggulan lainnya seperti kuat, ringan, tahan korosi, dan ekonomis, menyebabkan pemanfaatan material komposit semakin meluas mulai dari yang sederhana seperti alat-alat rumah tangga (sapu, tali, keset), sampai sektor industry (sebagai bahan pembuatan karpet, pengisi sandaran kursi, dashboard mobil, kasur, genteng, plafon atau bahan panel dinding tahan gempa) (Sabari, 2009).

Pemakaian yang meluas tersebut karena kelebihanannya dibandingkan dengan material konvensional, antara lain:

1. Sifat mekanisnya istimewa dengan kuat luluh, modulus Young dan ketahan impak yang tinggi. Kekuatan lelahnya juga tinggi. Dibandingkan dengan kuat lelah baja dan paduan aluminium yang hanya sekitar 50% dari kekuatan statis maksimumnya, kuat lelah komposit bermatrik polimer berpenguat serat karbon sekitar 90% dari kekuatan statis maksimumnya (RV-Groovin.com, diakses tanggal 4 September 2008).
2. Ringan dan memiliki ketahanan korosi yang tinggi (Khalid dkk., 2005; Ogasawara dkk., 2007).
3. Biaya peralatan pembuatan produk yang berbentuk kompleks relatif rendah (Baillargeon dan Vu-Khanh, 2001).

Material komposit berserat alami merupakan salah satu jenis komposit. Material komposit dapat diklasifikasikan dari berbagai sudut pandang. Menurut matriknya, dikenal (Daniel dan Ishai, 1994) material komposit bermatrik polimer (*Polymer Matrix Composites* = PMCs), komposit bermatrik logam (*Metal Matrix Composites* = MMCs), komposit bermatrik keramik (*Ceramic Matrix Composites* = CMCs), dan karbon-karbon composite (*Carbon-Carbon Composites* = CCCs). Menurut ukuran material pengisinya, terdapat komposit makro seperti beton bertulang (Capozucca, 2007), komposit mikro atau biasa disebut dengan komposit seperti paduan titanium yang diperkuat dengan serat silicon karbida (Mall dan Cunningham, 2007), dan komposit nano (Mardiansyah dkk., 2016). Sedangkan menurut bentuk material pengisinya, material komposit dapat dikelompokkan menjadi (Vinson dan Sierakowski, 2002) komposit partikel (*particulate composites*), komposit serpih (*flake composites*), dan komposit serat (*fibrous composites*).

Selanjutnya, komposit serat dapat dibedakan menjadi komposit berserat pendek (*chopped fiber composites*), dan komposit berserat kontinu (*continuous fiber composites*). Serat pada komposit berserat kontinu dapat disusun dengan berbagai pola, seperti searah (*unidirectional*), anyam dua dimensi (*2D wave*) maupun anyam tiga dimensi (*3D wave*). Pola anyaman juga ada berbagai macam. Serat yang digunakan juga dapat berupa serat buatan (*synthetic fibers*)

maupun serat alami (*natural fibers*) yang kemudian menghasilkan *synthetic fiber composites* dan *natural fiber composites*. Karakteristik matrik yang telah dipilih akan membatasi kemungkinan serat pasangan yang dapat digunakan. Itulah sebabnya polimer termoset paling banyak digunakan bersama serat alami yang tidak tahan suhu tinggi.

Bila matrik yang digunakan lebih dari satu macam maka akan dihasilkan komposit hibrid matrik, sedangkan bila digunakan lebih dari satu macam serat maka akan dihasilkan komposit hibrid serat. Bila komposit dikombinasikan dengan material lain membentuk suatu struktur tertentu maka akan dihasilkan komposit *sandwich*.

2.3. Material Pengikat/Matrik: Poliester dan Epoksi

Polimer dapat dikelompokkan menjadi dua, yakni termoset dan termoplastik. Pada suhu ruang, termoset resin berwujud cair, dan dapat mengeras dalam waktu beberapa bulan. Dengan bantuan katalis atau material pengeras (*hardener*), proses pengerasan bisa dipercepat. Proses pengerasan termoset resin disebut konsolidasi. Termasuk kelompok ini misalnya poliester dan epoksi (Sidwell, 1998). Poliester memiliki viskositas yang relatif rendah, mengeras pada suhu kamar dengan penambahan katalis (Surdia dan Saito, 1999).

Kelebihan poliester diantaranya adalah murah, ketahanan terhadap cuaca sangat baik, tahan terhadap kelembaban, pengikisan, zat kimia, serta tahan sampai suhu sekitar 80°C dan sinar ultra violet bila dibiarkan diluar dan sifat tembus cahaya permukaan rusak dalam beberapa tahun. Salah satu jenis poliester yang banyak digunakan untuk memproduksi material komposit adalah poliester tak jenuh SHCP 268 BQTN. Karakteristik poliester SHCP 268 BQTN disajikan pada Tabel 2.1 di halaman berikut.

Tabel 2.1. Karakteristik Poliester SHCP 268 BQTN dan Epoksi

Sifat	Poliester ¹⁾	Epoksi
Penyerapan air (dlm 7 hari) [%]	0,35	
Kekerasan Barcol [BHC]	48	
Suhu distorsi panas [°C]	67,3	
Regangan patah [%]	3,2	
Masa jenis resin cair (25 °C) [g/cm ³]	1,13	1,2 – 1,3 ²⁾
Penyusutan konsolidasi [%]	9	
Kandungan volatil [%]	40–43	
Kuat lengkung [MPa]	82,4	
Modulus lengkung [MPa]	5257,3	
Kuat tarik [MPa]	29,4	65,8 ± 1,9 ³⁾
Modulus tarik [MPa]		2940 ± 100 ³⁾
Kuat tekan [MPa]		89,1 ± 1,2 ³⁾
Modulus tekan [MPa]		2.620 ± 50 ³⁾

¹⁾FRP Service and Company; ²⁾Agarwal dkk., 2018; ³⁾Liu dkk., 2017.

Sementara itu, epoksi yang jauh lebih mahal dengan unjuk kerja yang tinggi banyak digunakan dalam industri pesawat terbang (Callister, 2007). Dibandingkan dengan matrik polimer lainnya, kelebihan epoksi yang paling utama adalah penyusutannya selama konsolidasi yang kecil sehingga perubahan bentuk yang terjadi kecil dan akurasi ukuran produk akan lebih tinggi, memiliki ikatan yang kuat dengan berbagai macam serat sehingga pamakainya menjadi sangat luas (Penn dan Wang, 1998: 48-74). Selain itu, laju penyerapan uap airnya rendah (Chawla, 1987), tahan terhadap lingkungan yang ekstim seperti korosif, dan konsolidasinya tidak menghasilkan produk samping yang merugikan sehingga kemungkinan terperangkapnya uap air dapat diminimalisir (Penn dan Wang, 1998: 48-74). Pada Tabel 2.1 disajikan beberapa sifat penting epoksi Araldite-F produksi Huntsman (Liu dkk., 2017).

2.4. Serat Sebagai Material Pengisi (*Filler*) dan Penguat

Serat merupakan salah satu jenis material pengisi material komposit. Menurut jenisnya serat dapat dikelompokkan menjadi serat sintetis dan serat alami. Sedangkan menurut panjang relatifnya dapat dibedakan menjadi serat pendek (*chopped fiber*) dan serat panjang (*continuous fiber*). Disebut serat panjang atau kontinu apabila panjangnya minimal 1000 kali diameternya. Sehingga serat karbon yang diameternya 8 – 10 μm , maka dikatakan serat karbon tersebut kontinu bila panjangnya sekitar 10 mm atau lebih, sedangkan serat alami yang berdiameter sekitar 400 μm dikatakan serat panjang atau kontinu bila panjangnya sekitar 400 mm.

2.4.1. Serat sintetis

Serat sintetis adalah serat buatan melalui suatu proses tertentu. Karena buatan, maka komposisi kimianya bisa diatur untuk memperoleh sifat-sifat terbaiknya. Termasuk serat sintetis misalnya serat gelas dan serat karbon. Serat gelas atau kaca yang merupakan serat yang paling banyak digunakan karena kuat tarik dan modulusnya yang tinggi, relatif murah dan mudah diperoleh karena ketersediaannya yang melimpah. Serat karbon memiliki kuat tarik dan modulus lebih tinggi dari serat gelas, tahan suhu tinggi dan massa jenisnya lebih rendah (Reder dkk., 2003), tapi harganya bisa sepuluh kali lebih mahal dibanding serat gelas dan ketersediaannya juga terbatas.

Serat kaca cenderung bersifat isotropis (Chawla, 1987, p. 11) disebabkan struktur kristalnya yang berbentuk rangkaian tiga dimensi. Serat gelas pada umumnya relatif murah, memiliki kuat tarik yang tinggi, ketangguhan retaknya tinggi, serta tidak begitu sensitif terhadap kondisi lingkungan, kelembaban dan kenaikan temperature. Karakteristik serat kaca-E ditentukan antara lain oleh komposisi kimianya. Sedangkan karakteristik serat karbon ditentukan oleh bakalan dan pemrosesannya yang akan menentukan susunan rangkaian atom karbonnya (Lafdi dan Wright, 1998). Komposisi kimia serat

kaca-E dan serat karbon kekuatan sedang (*moderate strength carbon fiber*) ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut.

Beberapa sifat penting serat gelas dan serat karbon ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2. Komposisi kimia serat kaca-E (Callister, 2007)

Komponen	Kadar [%]	Komponen	Kadar [%]
Silika, SiO ₂	54,3	Magnesia, MgO	4,7
Alumina, Al ₂ O ₃	15,2	Sodium oksida, Na ₂ O	0,6
Calcium oksida, CaO	17,2	Boron oksida, B ₂ O ₃	8,0

Tabel 2.3. Beberapa sifat penting serat kaca-E dan serat karbon

Komponen	Serat kaca-E ¹⁾	Serat karbon ²⁾
Diameter [μm]	-	11
Masa jenis [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,54	1,99
Koefisien muai termal linier [$\times 10^{-6}\text{C}^{-1}$]	4,7	-
Kuat tarik pada 22 °C [MPa]	3348	2760
Modulus tarik pada 22 °C [GPa]	72,4	201
Perpanjangan luluh [%]	4,8	-

¹⁾Callister, 2007; ²⁾BP Amoco Chemicals,2008

2.4.2. Serat alami

Pada kajian ini ijuk aren dipilih sebagai material pengisi dan penguat. Tanaman aren di Indonesia mencakup 70.000 hektare (Nurdina, 2016). Tanaman ini tersebar di Kalimantan Timur (17.794 hektare), Kalimantan Tengah (17.000 hektare), Jawa Tengah (13.878 hektare), dan di beberapa propinsi lainnya. Kabupaten Ciamis merupakan penghasil utama ijuk di provinsi Jawa Barat (Pemda Jawa Barat, 2013), sedangkan Kabupaten Temanggung merupakan penghasil utama ijuk di provinsi Jawa Tengah dengan luas lahan seluas 573,93 hektare (Pemkab Temanggung, 2008). Produksi nasional ijuk

mencapai 164.389 ton per tahun (Munandar dkk., 2013). Selama ini ijuk telah digunakan untuk pembuatan sapu, tali dan material penyaring sarana sanitasi dan penyaringan air (Pemda Jawa Barat, 2013; Pemkab Temanggung, 2008). Potensi sifat mekanis serat ijuk belum digunakan untuk material struktur bangunan mesin dan sipil.

Untuk meningkatkan kuat rekatan pada *interface* serat-matrik pada komposit berserat alami dilakukan perlakuan terhadap serat sebelum serat tersebut digunakan sebagai penguat. Diantara perlakuan awal terhadap serat tersebut misalnya dengan perlakuan sodium hidroksida (Sudarisman dkk., 2013), air panas (Santos dkk., 2018), kalium hidroksida (Santhiarsa, 2016) dan asetilasi (Diharjo dkk., 2016). Sifat-sifat beberapa serat yang banyak digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4. Karakteristik beberapa serat alami (Rao dan Rao, 2007)

Jenis serat alami	Regangan patah[%]	Kuat tarik [MPa]	Modulus Young[GPa]	Kuat tarik spesifik[Mpa/(kg·m ⁻³)]	Modulus spesifik[GPa/(kg·m ⁻³)]
Pelepah aren	3,46	549	15,85	0,6678	19,56
Daun kurma	2,73	309	11,32	0,3121	11,44
Pelepah kurma	24,00	459	1,91	0,4781	1,99
Bambu (bagian luar)	1,40	503	35,91	0,5527	39,47
Bambu (bagian dalam)	1,73	341	19,61	0,3831	22,10
<i>Ijuk</i>	<i>13,71</i>	<i>377</i>	<i>2,75</i>	<i>0,3660</i>	<i>2,67</i>
Sabut kelapa	20,00	500	2,50	0,4348	2,17
Batang pisang	3,36	600	17,85	0,4444	13,22
Sisal	5,45	567	10,40	0,3910	7,17

2.5. Antar Muka Serat-Matrik

Interface ditandai adanya diskontinuitas (Dzral, 2001), yakni perubahan sifat, baik fisis, mekanis, termal, maupun elektris, dari satu sisi ke sisi lainnya, misalnya dari serat ke matrik atau sebaliknya. Sifat bawaan bahan pembentuknya dan sifat *interface* (Netravali dkk., 1989a) akan menentukan sifat mekanis komposit yang dihasilkan (Deng dkk., 1999). Hal ini selanjutnya menentukan keefektifan transfer beban dari suatu serat tertentu ke matrik di sekelilingnya dan selanjutnya ke serat di sekelilingnya.

Dzral (2001) melaporkan bahwa kuat rekatan pada *interface* komposit polimer diperkuat serat karbon, tergantung pada: tingkat pembasahan serat oleh matrix, serta tegangan sisa akibat penyusutan resin dan panjang seratnya (Piggott dan Andisson, 1987). Rekatan pada *interface* serat sintesis dapat ditingkatkan dengan penyalutan serat sebelum ditanamkan pada matrix. Sementara itu Zhu dkk. (1998) menemukan bahwa kuat tarik komposit serat SiC/Al dapat ditingkatkan sampai dengan 45% dengan penyalutan serat menggunakan SiO₂. Karakteristik *interface* akan menentukan redistribusi tegangan bila suatu serat mengalami patah (Amer dan Schadler, 1987).

Dari sudut pandang mekanika material, rekatan *interface* yang kuat pada suatu struktur komposit yang terbebani tarik, pada V_f rendah maka serat akan menerima beban yang lebih kecil dari yang dapat diterima oleh matrik. Perlu dicatat bahwa regangan patah serat pada umumnya lebih tinggi dari regangan patah matrik, sehingga serat akan mengalami retak lebih dahulu dibandingkan dengan matriknya, yang selanjutnya dihasilkan patah tunggal. Untuk V_f rendah adanya rekatan *interface* yang kuat menyebabkan beban yang mampu diterima serat akan lebih besar dari pada yang dapat diterima oleh matrik, sehingga matrik akan mengalami gagal geser memanjang arah serat dan menyebabkan patah getas dengan banyak permukaan patahan (Agarwal dkk., 2018; Hamada dkk., 1992).

Debonding atau lepasnya rekatan pada *interface* bermula ketika perbedaan regangan yang terjadi pada sisi serat dengan yang terjadi

pada sisi matrix mencapai suatu nilai kritis tertentu (Hsueh, 1996). Pada awalnya, kekuatan rekatan *interface* diyakini dibatasi oleh kekuatan matrik (Bader and Bowyer, 1973), yang besarnya sedikit lebih tinggi dari kuat geser matrik (Selby and Miller, 1975). Dengan kemajuan metoda eksperimen akhirnya Netravali dkk. yang mengkaji komposit serat kaca/epoksi (1989a) dan komposit serat grafit/epoksi (1989b) menemukan bahwa sebenarnya bukanlah *interface* yang mengalami kegagalan, namun matrix di sekitar *interface* tersebutlah yang mengalami gagal geser lokal, dan mereka menemukan bahwa kuat geser *interface* bisa mencapai beberapa kali lebih kuat dari pada kuat geser luluh matrixnya. Bila matrix yang memiliki modulus elastis yang lebih rendah mengalami deformasi yang berlebihan dan retak awal mulai terjadi, sebagian besar beban akan ditransfer ke serat di sekelilingnya.

Bila rekatan pada *interface* lemah maka *debonding* akan mulai terjadi pada *interface* (Sun dan Singh, 2000) dan akan menjalar membentuk patahan banyak (Agarwal dkk., 2018). Rekatan *interface* yang lemah diperlukan untuk meningkatkan ketangguhan CMC mengingat peningkatan ketangguhan CMC berhubungan erat dengan *interface debonding*, serta terpisahnya dan tercabutnya serat (Sun dan Singh, 2000).

2.6. Fabrikasi Material Komposit Bermatrik Termoset

2.6.1. Susunan serat

Fiber architecture yang meliputi perbandingan panjang dengan diameter serat, arah susunan serat relatif terhadap arah bebannya, pola penyusunan seratnya, dan kadar seratnya (Mussig, 2010) akan sangat mempengaruhi sifat-sifat material komposit yang dihasilkan. Oleh karena itu, sesuai dengan tuntutan karakteristik beban dan pembebanannya untuk memproduksi material komposit digunakan serat pendek yang tersusun secara acak, maupun serat panjang

kontinu yang disusun baik secara acak maupun dengan pola tertentu. Bila pembebanan pada satu arah misalnya pada balok dengan beban lengkung murni maka susunan serat kontinu searah akan merupakan pilihan yang optimal. Bila pembebanan pada bidang seperti dek atau lantai maka susunan anyam serat kontinu adalah yang terbaik, sedangkan bila sebagai papan panel seperti pada dinding atau daun pintu maka serat pendek searah akan lebih menguntungkan karena fabrikasinya akan lebih mudah.

2.6.2. Teknik Fabrikasi

Perbedaan ukuran diameter dan panjang serat akan menentukan teknik fabrikasi material komposit bermatrik polimer termoset yang sesuai. Untuk serat pendek beberapa teknik yang biasa digunakan antara lain *sheet molding compound* (SMC), *bulk molding compound* (BMC), *injection moulding* dan *spray up technique*. Sedangkan untuk serat kontinu beberapa teknik fabrikasi yang sering digunakan antara lain *hand lay up*, *bladder moulding*, pultrusi, dan *filament winding* (Divya dkk., 2016). Pada bagian ini akan didiskusikan lebih lanjut teknik fabrikasi tersebut adalah yang digunakan dalam kajian ini yakni teknik *hand lay up* yang digunakan dalam penyusunan seratnya. Sedangkan teknik pencetakan plat yang akan digunakan sebagai spesimen dilakukan dengan teknik cetak tekan dingin (*cold press*).

Sesuai dengan namanya, pada teknik ini penyusunan serat dilakukan secara manual, baik untuk bentuk rata maupun kontur. Untuk produk berbentuk kontur digunakan cetakan, bisa dengan cetakan luar atau cetakan dalam sesuai dengan sisi permukaan yang diharapkan berpenampilan baik dan menarik. Sebagai bahan cetakan dapat digunakan kayu, logam, plastik, gips, atau kombinasi dua atau lebih jenis bahan tersebut. Produk yang biasa dibuat dengan teknik ini misalnya badan perahu kecil, cerobong, tangki, furniture, dan bahan-bahan lembaran setengah jadi.

Teknik ini paling banyak digunakan, baik untuk cetakan sekali pakai maupun untuk digunakan secara berulang. Matrik yang paling banyak

digunakan adalah poliester, namun demikian jenis resin termoset lainnya, misalnya epoksi, juga bisa digunakan. Hal ini karena proses konsolidasi pada termoset tidak harus menggunakan panas maupun tekanan.

Permukaan cetakan dipoles sampai halus, dihampar *release film* atau *release agent* sesuai dengan bentuk permukaan produk. Bila digunakan *release agent*, maka setelah diaplikasikan dengan kuas harus ditunggu sampai kering. Selanjutnya permukaannya dilapisi lagi dengan *gel coat* sebagai pemisah produk dengan cetakannya dan agar permukaan hasil cetakannya halus. Setelah cetakan tersebut siap, serat kemudian disusun pada cetakan dan dibasahi dengan resin. Pembasahan bisa dilakukan dengan menuang dan meratakannya, menguas atau menyemprot susunan serat tersebut. Bila diperlukan ketebalan tertentu atau susunan serat secara berlapis dengan orientasi yang berbeda, maka lapis kedua material penguat kemudian dihamparkan di atas lapisan pertama yang telah dibasahi, kemudian lapisan kedua ini dibasahi lagi dengan cara sama seperti pada lapisan pertama. Setelah tebalnya tercapai dan fiber telah terbasahi dengan merata, maka permukaannya ditutup dengan *release film* untuk kemudian dilakukan pengerolan. Pengerolan dimaksudkan agar terjadi pemadatan fiber dan kemungkinan adanya gelembung udara yang terperangkap pada resin atau diantara serat dapat didorong keluar sehingga kadar *void* atau gelembung udara pada produk bisa minimal. Proses konsolidasi akan berlangsung dalam waktu yang sangat bervariasi, tergantung pada jenis matrik yang digunakan. Untuk poliester bisa antara satu sampai dengan empat jam tergantung pada kadar katalis yang digunakan. Sedangkan untuk resin epoksi sekurang-kurangnya 10 jam dan bisa sampai dengan lebih dari 24 jam.

Untuk mempercepat proses konsolidasi, dapat dibantu dengan pemanasan sampai dengan sekitar 80 °C. Produk yang dihasilkan pada umumnya belum dapat dibebani, untuk itu diperlukan proses konsolidasi lanjutan melalui proses *post curing* pada suhu sampai dengan 100 °C selama sampai dengan empat jam, atau pada suhu lingkungan selama sampai dengan empat hari. Untuk mencegah

terjadinya perubahan bentuk selama *post curing*, maka sangat disarankan digunakan jig. Selain untuk pembuatan perahu, teknik ini banyak digunakan dalam pembuatan sudu-sudu kincir angin dan produk seni atau kerajinan.

Dibandingkan dengan teknik fabrikasi lainnya, *hand lay up* memiliki beberapa kelebihan, antara lain benda yang bentuknya rumit dapat dibuat, pelaksanaannya mudah dan biaya peralatannya murah, tidak memerlukan keahlian khusus, bentuk dan ukuran desain dan cetakannya sangat mudah dimodifikasi dengan biaya rendah, dan konstruksi berlapis dapat diproduksi. Namun demikian, teknik ini juga memiliki beberapa kekurangan, seperti karena padat karya maka memerlukan waktu yang relatif panjang, diperlukan kekentalan resin yang rendah agar pembasahan dapat merata dan baik, hanya dapat digunakan untuk produk berukuran kecil, kualitas produk sangat tergantung pada keahlian pembuatnya, tingkat ketelitiannya rendah, hanya satu sisi yang berkualitas penampilan yang baik yakni sisi yang menempel pada cetakan, dan bahan yang terbuang relatif banyak sehingga kemungkinan terjadi kadar konstituen yang tidak sesuai rancangan cukup besar. Hal ini telah dilaporkan oleh Sudarisman (2006).

2.7. Material Komposit Diperkuat Serat Sintetis

Karena kelebihanannya dibandingkan dengan material konvensional, material komposit berserat sintetis telah digunakan secara luas dalam berbagai produk, mulai komponen otomotif (Khalid dkk, 2005; Denton, 1998), pesawat terbang (Khalid dkk, 2005; Hadcock, 1998), teknologi ruang angkasa (Mazumdar, 2002), bangunan struktur kelautan (Srivastava, 1999; Sutherland dan Guedes-Soares, 2004), struktur teknik sipil (Barbero, 1998; Senne, 2000), peralatan listrik dan elektronika (Loud, 1998), dan juga peralatan olah raga (Spencer, 1998; Sport bicycle catalog, 2017).

Tabel 2.5. Sifat-sifat material konvensional dan komposit berserat sintetis (Sudarisman, 2009, dari berbagai sumber)

Material	Massa Jenis [g/cm ³]	Ketahanan impak Izod [J/m]	Batas Lelah, pada N = 10 ⁶ [MPa]
Logam dan paduannya:			
Aluminium 7075 T6	2,81 ¹⁾		96 ¹²⁾
Aluminium 6005 T6			31 ¹³⁾
FeC, 021%C, dianil	7,86 ²⁾		220 ¹⁴⁾
Ti paduan, 99.2% Ti	4,51 ³⁾	43 ⁸⁾	
Ti-6Al-4V standar			400 ¹⁵⁾
Ti-6Al-4V bijih			524 ¹⁵⁾
Keramik dan kaca:			
Al ₂ O ₃ , 99.5% padatan	3,89 ⁴⁾		
Si ₃ N ₄			530 ¹⁶⁾
Polimer dan elastomer:			
Epoksi resin	1,12 – 1,30 ⁵⁾	10 – 50 ⁵⁾	
Polisulfone			18 ¹⁷⁾
Poliacetal			22 ¹⁸⁾
PMMA		24 ⁹⁾	
Komposit:			
CFRP	1,26 ⁶⁾	31 ¹⁰⁾	70 ¹⁹⁾
GFRP	1,99 ⁷⁾	107 ¹¹⁾	46 ²⁰⁾

Catatan untuk Tabel 2.5: ¹⁾(Bray, 1996, p.47), ²⁾(Shackelford dan Alexander, 2001, Table 25), ³⁾(Shackelford dan Alexander, 2001, Tabel 35), ⁴⁾(Dowling, 1993, p. 80), ⁵⁾(Sheeley, 1999, pp. 90-96), ⁶⁾(Botelho dkk., 2003, serat karbon/poliamida, $V_f = 50\%$), ⁷⁾(Zweben C., 2006, komposite kaca-E/epoksi, $V_f = 60\%$), ⁸⁾(Shackelford dan Alexander, 2001, Tabel 212, Charpy, spesimen bertakik), ⁹⁾(Dowling, 1993, p. 158), ¹⁰⁾(Gustin dkk., 2005; Seo dkk., 2005), ¹¹⁾(Shackelford dan Alexander, 2001, Tabel 215.1, serat gelas/polikarbonat, $V_f = 30\%$), ¹²⁾(Bray, 1996), ¹³⁾(Seo dkk., 2005, $f = 5$ Hz), ¹⁴⁾(Wilson, 1996, $N = 107$, $f = 22$ Hz), ¹⁵⁾(Gerasimchuk, 2006), ¹⁶⁾(Rosler, 2007, $R = -1$), ¹⁷⁾(Rosler, 2007, p. 365), ¹⁸⁾(Rosler, 2007, p. 364, $f = 1.67$ Hz), ¹⁹⁾(Rosler, 2007, p. 365, serat karbon pendek/polisulfone, V_f

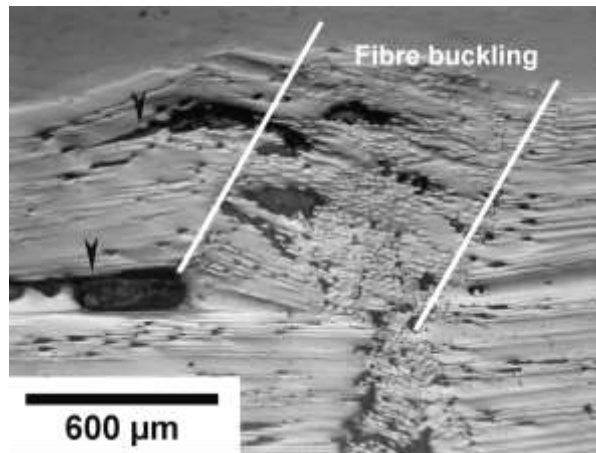
=40%),²⁰⁾(Rosler, 2007, p. 365, serat karbon pendek/polisulfone, $V_f = 40\%$).

Berbagai macam serat sintetis dan berbagai matrik polimer, logam maupun keramik digunakan dalam membuat berbagai macam produk tersebut, tergantung pada karakteristik pembebanan dan kondisi lingkungan pemakaiannya. Mulai dari serat kaca-E yang berkekuatan tinggi dan murah untuk pembuatan bagian buritan, anjungan depan dan lantai kapal penumpang, tiang layar kapal layar, dan jembatan penyeberangan orang; serat Kevlar untuk pembuatan reflektor pada SuDerbidr SCS; serat karbon yang unjuk kerjanya tinggi dengan massa jenis yang rendah dan sangat mahal untuk pembuatan raket bulu tangkis dan tenis, tongkat golf dan hoki, rangka sepeda balap, dinding mobil mewah Porsche Carrera GT all-carbon, dan komponen sayap pesawat Sukhoi S-27 Berkut; sampai dengan serat keramik untuk pembuatan cerobong pendorong pada pesawat ulang alik.

Demikian juga, berbagai macam matrik telah digunakan, mulai dari polimer untuk produk yang digunakan pada suhu ruang, sampai dengan keramik untuk produk yang bekerja pada suhu ekstra tinggi seperti cerobong pendorong dan perisai panas pada pesawat jet (Elam dkk., 2000). Sifat fisik dan mekanik beberapa material konvensional dan komposit berserat sintetis yang digunakan secara luas disajikan pada Tabel 2.5 di halaman depan.

Serat sintetis pada umumnya memiliki kuat tekan yang lebih rendah dari kuat tariknya. Oya dan Hamada (1996) melaporkan bahwa kuat tekan beberapa jenis serat karbon berkisar antara ~15,6% (M50J) sampai dengan ~30,8% (T700S) dari kuat tarik masing-masing. Sedangkan Hawthorne dan Teghtsoonian (1975) sebelumnya melaporkan bahwa kuat tekan serat karbon berkisar antara 1 GPa untuk serat karbon bermodulus tinggi sampai dengan ~2,2 GPa untuk serat karbon dengan kesearahan susunan atom sedang. Itulah sebabnya balok prismatis komposit berpenguat serat karbon yang menerima beban lengkung mengalami kegagalan berawal di sisi tekannya (Oya dan Hamada, 1996; Greenhalgh, 1993). Moda gagal utamanya adalah *kinking* yang menyebabkan tekukan lokal dan delaminasi (Gilchrist

dkk, 1996). Ilustrasi moda gagal tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 . Balok komposit berserat sintetis dengan $L/d = 32$ gagal pada sisi tekannya menunjukkan tekukan lokal serat pada bagian atas dan delaminasi pada bagian tengah (panah hitam) (Sudarisman, 2009)

2.8. Material Komposit Diperkuat Serat Alami

Makin meningkatnya kesadaran akan perlunya pelestarian lingkungan mendorong diberlakukannya peraturan penanganan produk pascapakai di berbagai negara (Wambua dkk., 2003) sehingga pemakaian serat alami, yang memiliki masa penguraian secara lamiah yang lebih pendek, sebagai material pengisi (*filler*) material komposit semakin meluas. Selain masa untuk penguraiannya secara alamiah yang pendek, serat alami juga memiliki massa jenis yang rendah sehingga sejak awal milenium ini serat alami seperti *jute*, henep dan kenaf banyak digunakan sebagai material pengisi untuk polimer termoset dalam memproduksi interior kendaraan baik buatan Eropa, Amerika Serikat maupun Asia (Suddel dan Evans, 2003; Proemper, 2006) yang tidak memikul beban yang terlalu berat. Diantara komponen tersebut antara lain dinding dalam pintu dan panel belakang tempat duduk mobil

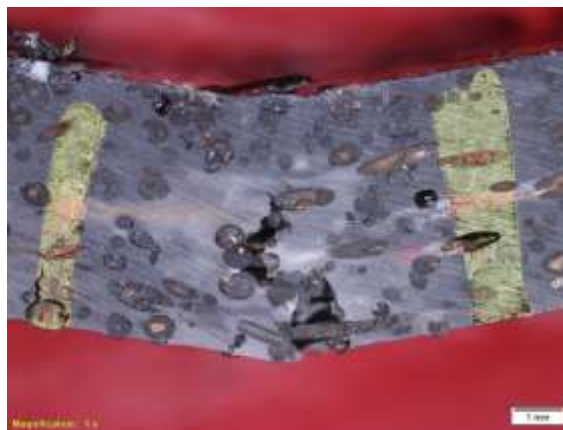
Tabel 2.6. Karakteristik komposit bermatrik polimer berserat alami

Serat	Matrik	Kadar serat [%]	Sifat yang dikaji	Sifat matrik [MPa]	Sifat Komposit [MPa]
Batang pisang ¹⁾	Epoksi	-	Kuat tarik	23,98	45,57
			Kuat lengkung	53,38	73,58
			Modulus tarik	1390,0	1890,0
			Modulus lengkung	1563,2	1834,6
Batang pisang dengan perlakuan ²⁾	PP	15 vol	Kuat tarik	24,5	~32,58
			Kuat lengkung	38,0	~56,24
			Modulus tarik	560	~1024,8
			Modulus lengkung	1650	~3712,5
Bambu dengan perlakuan ³⁾	PP	50 wg	Kuat tarik	24,5	~50,47
			Kuat lengkung	38,0	~69,16
			Modulus tarik	560	~1635,2
			Modulus lengkung	1650	~4125,0
Bambu tanpa perlakuan ⁴⁾	PP	50 vol	Kuat tarik	-	22,5
			Modulus tarik	-	17600
Daun nanas dengan perlakuan ⁵⁾	PP	20 wg	Kuat tarik	24,5	35,0
		30 wg	Kuat lengkung	38,0	58,1
		40 wg	Modulus tarik	560	739,2
		30 wg	Modulus lengkung	1300	-
Daun nanas tanpa perlakuan ⁶⁾	Poliester	40 wg	Kuat tarik	22,9	63,2
		30 wg	Kuat lengkung	80,2	90,6
		40 wg	Modulus tarik	580	2523
		40 wg	Modulus lengkung	1300	2665
Sisal tanpa perlakuan ⁷⁾	LDPE	30 wg	Kuat tarik	9,2	14,7
		21,5vol	Modulus tarik	140	781,2
Sisal dengan perlakuan ⁸⁾	LDPE	30 wg	Kuat tarik	9,0	31,1
		21,5vol	Modulus tarik	140	1334,2

Catatan kaki untuk Tabel 2.6: ¹⁾Maleque dkk., 2007, ²⁾Chattopadhyaydkk.,2010, ³⁾Chattopadhyaydkk.,2011, ⁴⁾Okubo dkk.,2004, ⁵⁾Hujuri et al, 2008, ⁶⁾Devi et al, 1997, ⁷⁾Joseph dkk., 1999, ⁸⁾Kalaprasad dkk., 1999.

BMW, dinding dalam pintu dan panel instrumen mobil Daimler Chrysler, serta dinding dalam pintu dan panel instrumen mobil Mitsubishi.

Berbagai serat alami yang dipasangkan dengan matrik yang berbeda-beda telah diteliti dan karakteristiknya seperti disajikan pada Tabel 2.6 di halaman depan. Berbeda dengan serat sintetis yang memiliki kuat tarik yang jauh lebih tinggi dari kuat tekannya, komposit berserat alami yang menerima beban lengkung pada umumnya mengalami kegagalan berawal pada sisi tariknya (Sudarisman dkk, 2015), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 di bawah. Hal ini menunjukkan bahwa komposit berserat alami lemah pada sisi tariknya.



Gambar 2.4. Kegagalan balok komposit serat ijuk pendek acak/ poliester yang diuji pada $L/d = 24$ menunjukkan terjadinya retak yang berawal di sisi tariknya (Sudarisman, 2018).

Selain aplikasinya dalam dunia industri otomotif, komposit berserat alami juga sudah digunakan secara luas untuk berbagai komponen bangunan (Mussig, 2010). Berbagai produk, seperti lantai, panil dinding, pintu, jendela, bagian-bagian tangga dan langit-langit telah banyak yang dibuat dari material komposit bermatrik polimer berpengisi atau penguat serat alami dan telah banyak digunakan.

SIFAT-SIFAT MATERIAL KOMPOSIT

Sifat-sifat material komposit selain ditentukan oleh sifat material pembentuknya, juga ditentukan oleh kadar, geometri dan pola susunan material pengisi, serta karakteristik antar muka *filler*-matrik komposit tersebut. Karakteristik antarmuka *filler*-matrik akan menentukan mekanisme transfer beban dari matrik ke material pengisi, diteruskan ke matrik di sekelilingnya dan diteruskan lagi ke material pengisi yang berada di sekelilingnya. Jenis rekatan pada antarmuka *filler*-matrik dapat berupa rekatan difusi (*diffusion bonding*), rekatan kimiawi (*chemical bonding*), rekatan elektrostatis (*electrostatic bonding*) atau kunci mekanis (*mechanical interlocking*).

Berbeda dengan material konvensional pada umumnya, seperti berbagai jenis logam dan beton tanpa tulangan yang bersifat isotropis, material komposit dapat dirancang untuk bersifat isotropis, ortotropis maupun anisotropis tergantung pada kebutuhan pemakainnya. Komposit berpengisi partikel atau serat pendek yang tersusun secara acak cenderung bersifat isotropis, Material komposit berpenguat serat kontinu searah akan bersifat ortotropis, sedangkan material komposit laminat dengan susunan serat yang bervariasi dapat dibuat bersifat anisotropis.

3.1. Kandungan Serat

Sebagaimana telah disampaikan di depan bahwa *fiber architecture* sangat menentukan karakteristik material komposit yang dihasilkan. Kadar serat suatu produk komposit dapat diperkirakan dengan dengan menerapkan *the Rule of Mixture* (RoM), dengan syarat bahwa massa jenis masing-masing material konstituen diketahui, dan sampel yang digunakan harus cukup besar. Makin kecil selisih massa jenis antara serat dengan matriknya, akan makin rendah kecermatan prediksinya. Berdasar pada RoM, kadar serat dapat diprediksi dengan persamaan

$$V_f = \frac{\rho_f - \rho_c}{\rho_f - \rho_m} \quad (1)$$

dengan V_f , ρ_f , ρ_m dan ρ_c berturut turut adalah kadar serat [cm^3/cm^3 , vol% atau g/g, wt%], massa jenis serat [g/cm^3], massa jenis matrik [g/cm^3], dan massa jenis komposit [g/cm^3]. Massa jenis komposit diperoleh dari pengujian menurut ASTM D792, atau dengan pendekatan melalui penimbangan dan pengukuran sampel, kemudian dihitung dengan rumus

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} \quad (2)$$

dengan m_c dan v_c berturut-turut adalah massa [g] dan volume [cm^3] sampel yang ditimbang dan diukur.

Cara lain untuk memperoleh harga kadar serat suatu material komposit adalah dengan metode pelarutan atau pembakaran untuk komposit bermatrik polimer sebagaimana diatur dalam standar ASTM D3171, serta dengan prediksi penampang lintang foto mikro khusus untuk material komposit berserat searah seperti yang diterapkan oleh Sudarisman dkk (2014).

3.2. Pembebanan Lengkung

3.2.1. Hubungan Defleksi-Gaya Lateral

Pembebanan lengkung bisa ditemui dalam beberapa konstruksi mesin, misalnya balok-balok pada konstruksi kapal, komponen rangka mobil dan sepeda motor, dan batang penguat meja mesin perkakas. Menurut teori mekanika material, hubungan antara besar gaya lateral dengan penurunan atau defleksi yang terjadi pada tengah bentang suatu balok dengan tumpuan sederhana dinyatakan oleh

$$D = \frac{FL^3}{48EI} \quad (3)$$

dengan D , F , L , E dan I berturut-turut adalah defleksi yang terjadi setelah dilakukan koreksi sesuai dengan grafik hubungan $F-D$ dari pengujian [mm], besar gaya lateral [N], panjang bentang atau span pengujian [mm], modulus elastitas material komposit [MPa], dan inersia linear penampang lintang balok [mm⁴].

3.2.2. Kuat Lengkung

Material komposit memiliki karakteristik yang khas karena sifat anisotropisnya, berbeda dengan material konvensional yang bersifat isotropis. Makin panjang bentang suatu balok komposit, maka tegangan maksimum yang terjadi akan lebih tinggi dari pada balok yang lebih pendek sehingga balok komposit dibagi dua yakni balok pendek dan balok panjang (ASTM D790).

Menurut ASTM D790, besar tegangan maksimum atau kuat lengkung suatu balok komposit dinyatakan oleh

$$\sigma = \frac{3FL}{2EI}, \quad L/d \leq 16 \quad (4a)$$

$$\sigma = \frac{3FL}{2EI} \left[1 + 6 \frac{D^2}{L^2} - 4 \frac{dD}{L^2} \right], \quad L/d > 16 \quad (4b)$$

dengan d adalah tebal atau tinggi balok [mm].

3.2.3. Regangan pada Tegangan Maksimum dan Regangan Patah

Pada pengujian lengkung menurut standar ASTM D790, besar regangan yang terjadi dihitung menurut persamaan

$$\varepsilon = \frac{6dD}{L^2} \quad (5)$$

Dengan ε adalah besarnya regangan lentur yang terjadi [mm/mm]. Untuk memperoleh harga regangan pada tegangan maksimum, defleksi yang digunakan pada rumus di atas adalah defleksi pada saat terjadi gaya lateral maksimum. Nilai defleksi pada tegangan maksimum bisa diperoleh dari grafik $F-D$ pada titik beban maksimum hasil pengujian lentur. Sedangkan untuk menghitung besarnya regangan patah, nilai defleksi pada rumus di atas diperoleh dari grafik yang sama pada titik mulai terjadi kegagalan. Kedua nilai defleksi tersebut harus dikoreksi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk menghitung besarnya regangan lentur.

3.2.4. Modulus Elastisitas Lengkung

Kesalahan yang banyak dilakukan dalam menghitung nilai modulus elastisitas dari hasil pengujian adalah dengan langsung menggunakan definisi sesuai dengan hukum Hooke satu dimensi. Dalam hal ini untuk tegangan diambil pada titik tertinggi sedangkan nilai regangannya diambil pada titik ujung patahnya. Dengan harga regangan yang tinggi maka akan diperoleh harga modulus yang lebih rendah. Kesalahan

fatal dari penggunaan cara ini adalah menggunakan nilai tegangan dan nilai regangan dari dua titik yang berbeda.

Menurut standar ASTM D790, dari hasil pengujian dapat dihitung besar modulus lengkung dengan rumus

$$E = \frac{mL^3}{4bd^2} \quad (6)$$

dengan b dan d berturut-turut adalah lebar [mm] dan tebal atau tinggi [mm] spesimen uji. Sedangkan m adalah lereng atau slope [N/mm] di awal bagian yang lurus pada grafik F - D hasil pengujian. Sehingga

$$m = \frac{\Delta F}{\Delta D} \quad (7)$$

Dengan ΔF dan ΔD berturut-turut adalah selisih besar gaya lateral [N] antara dua titik yang diamati dan selisih besar defleksi [mm] yang terjadi antar kedua titik tersebut.

3.2.5. Kapasitas Penyerapan Energi

Kapasitas penyerapan energi, E_{abs} [J], suatu balok menunjukkan ketangguhan balok tersebut. Sedangkan kapasitas penyerapan energi spesifik, E_{abs}' [J/mm²], adalah nilai tersebut yang dihitung per satuan luas penampang lintang balok. Besar energi yang diserap oleh suatu balok dapat dihitung dengan rumus (Sudarisman dkk, 2009b)

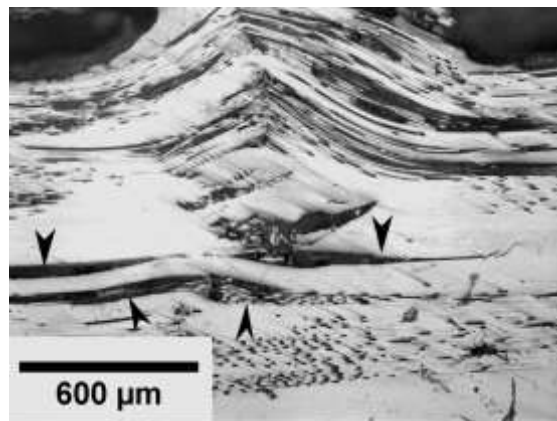
$$E_{abs} = \sum_{i=1}^{i=n-1} \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} (x_{i+1} - x_i) \right] \quad (8)$$

Harga n , pada persamaan di atas diperoleh dari file excel grafik F - D hasil pengujian lengkung, yakni titik terakhir grafik tersebut merupakan titik yang ke- n . Sedangkan F_i dan x_i berturut-turut adalah besar gaya lateral pada titik ke- i [N] dan besar penurunan yang

terekam pada titik tersebut [mm]. Sehingga besar energi terserap, E_{abs} , akan diperoleh dalam N.mm.

3.2.6. *Moda Gagal*

Moda gagal suatu balok dapat dievaluasi dari bentuk patahannya. Pada kajian ini analisis dilakukan terhadap fotomikro sampelnya. Komposit yang diperkuat serat sintetis pada umumnya mengalami kegagalan pada sisi tekannya (Sudarisman, 2009; Sudarisman, 2009a) akibat kuat tekan serat yang lebih rendah dari pada kuat tariknya. Gambar 3.1 di bawah menunjukkan perubahan bentuk yang terjadi di sekitar titik kegagalan material komposit berserat sintetis yang diuji pada $L/d = 16$.



Gambar 3.1. Contoh perubahan bentuk yang terjadi di sekitar titik kegagalan balok komposit berserat sintetis yang diuji pada $L/d = 16$ menunjukkan terjadinya delaminasi (panah) dan buckling serat di permukaan atas (Sudarisman, 2009).

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa kegagalan terjadi pada permukaan atas atau sisi tekan, sedangkan pada sisi bawahnya atau sisi tarik, tidak terlihat pada foto di atas, tidak terlihat adanya tanda retak sebagai awal terjadinya kegagalan.

Berbeda dengan material komposit berserat sintetis, material komposit berserat alami yang dibebani lengkung pada umumnya mengalami

kegagalan yang berawal pada sisi tariknya (Sudarisman dkk, 2014; Sudarisman dkk, 2015). Hal ini menunjukkan bahwa kuat tarik komposit berpenguat serat alami lebih rendah dari pada kuat tekannya, yang merupakan salah satu kelemahan komposit berpenguat serat alami.

3.3. Karakterisasi

Pada bagian ini akan disampaikan tentang detil pengujian lengkung menurut standar ASTM D790, dan teknis evaluasi moda gagalanya. Standar tersebut mengatur secara rinci tentang tata cara pengujian lenturan tiga titik, mulai persiapan dan jumlah spesimennya, pelaksanaan pengujian, dan pengolahan data hasil pengujiannya.

Menurut standar tersebut, spesimen berbentuk balok homogen dengan tebal 1/16 inch atau lebih, dan lebar 12,7 mm atau 0,5 inch yang tidak boleh lebih dari 1/4 kali panjang bentangnya, serta panjang bentangnya minimal 16 kali tebalnya yang diposisikan sebagai tinggi balok untuk memastikan bahwa balok yang diuji gagal dengan moda lengkung, bukan gagal dengan moda geser yang ditandai dengan terjadinya delaminasi. Delaminasi terjadi karena tegangan geser pada bidang utama yang terjadi akibat gaya lateral yang diberikan relatif besar dibandingkan dengan tegangan normal yang terjadi (Davies dan Hamada, 2001). Jumlah spesimen yang diuji untuk setiap variasi minimal lima buah. Spesimen tersebut dapat dicetak secara individual seperti bentuknya siap diuji atau dipotong dari plat yang dicetak secara lembaran. Bila spesimen uji diperoleh dari pemotongan lembaran plat maka bekas pemotongan memanjang harus dipoles halus untuk menghindarkannya dari efek bekas pemotongan (*edge effect*) yang dapat menurunkan besar gaya lateral yang dapat diterima (Sudarisman, 2009).

Laju kepala silang pada pengujianya adalah setara dengan peregangan sebesar 1% per menit, sehingga nilai tersebut adalah

$$v = \frac{0,01 L^2}{6 d} \quad (9)$$

Bila panjang bentang = L dan tebal balok = d diberikan dalam mm, maka laju kepala silang akan diperoleh dalam mm/min. Bila balok yang diuji sangat lentur, maka ada kemungkinan balok belum mengalami kegagalan pada regangan 5%. Dalam hal ini pengujian sudah dinyatakan cukup dan bisa dihentikan. Dengan laju peregangannya setara dengan 1% per menit, maka akhir menit kelima suatu pengujian yang tidak mengalami gagal sampai waktu tersebut sudah dapat dihentikan. Pada grafik penyajian hasil penelitiannya, ujungnya diberi anak panah ke arah kanan yang menandakan bahwa pada titik tersebut sebenarnya peregangannya masih terus berlangsung.

Selanjutnya, dari pengujian akan diperoleh dokumen numerik yang berisi data dan grafik hubungan $F-D$. Grafik tersebut harus diperiksa dan dilakukan koreksi yang disebut *toe compensation* terhadap nilai defleksi D bila titik-titik di awal pengujian menunjukkan adanya diskontinuitas. Diskontinuitas tersebut dapat disebabkan geometri spesimen yang tidak benar-benar rata sehingga bagian yang seharusnya menempel pada tumpuan ada yang bercelah. Setelah dilakukan koreksi terhadap nilai D barulah perhitungan nilai tegangan, regangan dan kapasitas penyerapan energinya dengan menggunakan persamaan-persamaan (3) sampai dengan (8) bisa dilakukan.

HIBRIDISASI SERAT ALAMI-SERAT SINTETIS

Hibridisasi dapat dilakukan untuk memperbaiki sifat-sifat material komposit. Beberapa penelitian tentang hal ini, terutama yang menggunakan serat sintetis telah banyak dilakukan. Sudarisman dkk (2007) melakukan substitusi parsial dengan berbagai konfigurasi serat silikon karbida untuk serat karbon guna meningkatkan kuat tekan komposit berserat karbon bermatrik epoksi. Tidak ditemukan adanya efek hibridisasi yang diduga karena serat silikon karbida memiliki massa jenis yang lebih tinggi dari pada serat karbon dengan modulus yang lebih rendah, walaupun kuat tekannya lebih tinggi.

Sudarisman dan Davies (2008) meneliti tentang komposit bermatrik epoksi diperkuat dengan kombinasi serat kaca-E dan serat kaca-S2 yang memiliki kuat tarik dan modulus yang lebih tinggi. Serat disusun secara searah dan berlapis dengan berbagai konfigurasi dan tiga panjang bentang yang berbeda, $L/d = 16, 32$ dan 64 , serta sifat mekanis yang diteliti adalah sifat lenturnya. Ditemukan bahwa dengan hibridisasi kekuatan lengkung balok dapat ditingkatkan dengan substutsi sebgain kecil seratnya. Untuk menjamin terjadinya gagal lentur, bukan geser antar-lapis, diperlukan L/d minimum 32. Selain itu, dengan substitusi 33% serat gelas-S2 untuk serat gelas-E diperoleh

kenaikan kuat lengkung tertinggi, yakni 23%, sedangkan modulus lengkungnya tidak mengalami kenaikan yang berarti. Hal ini mungkin disebabkan selisih kuat tarik antara kedua jenis serat mencapai 118% sedangkan selisih modulus elastisitasnya hanya 20%. Moda patah spesimen yang pendek, $L/d = 16$, adalah retakan geser antar lapisan. Sementara itu spesimen yang lebih panjang menunjukkan moda gagal lengkung berupa gagal tekan pada permukaan atas atau sisi tekannya yang ditandai dengan terbentuknya *kink band* dan tekukan lokal serat (Sudarisman dkk, 2008) yang merupakan ciri khas moda gagal tekan komposit berpenguat serat berkekuatan tarik tinggi seperti serat-serat sintetis.

Dalam hibridisasi dikenal istilah angka perbandingan hibridisasi (*hybrid ratio*) yang biasanya diberi notasi r_h . Yang dimaksud dengan angka perbandingan hibridisasi adalah perbandingan antara kuantitas yang disubstitusi dengan kuantitas total. Misalnya pada hibridisasi dengan substitusi serat gelas atau kaca untuk sebagian serat ijuk, maka angka perbandingan hibridisasi dinyatakan oleh

$$r_h = \frac{V_{fg}}{V_{f-tot}} \quad (10)$$

dengan V_{fg} = fraksi volume serat gelas atau kaca, dan V_{f-tot} = fraksi volume serat total.

Walaupun sebagian besar hibridisasi dilakukan pada material pengisinya, namun sebenarnya hibridisasi bisa juga dilakukan pada material pengikatnya. Pada yang pertama material pengisi atau penguatnyalah yang dibuat lebih dari satu macam, sedangkan pada yang kedua material pengikatnyalah yang dibuat lebih dari satu macam. Pemilihannya sangat ditentukan oleh aplikasinya dan tinjauan material pembentuk komposit yang lebih dominan dalam menentukan karakteristik material komposit yang akan dihasilkan.

4.1. Material Komposit dengan Hibrid Matrik

Tidak banyak dilaporkan tentang komposit material dengan hibrid matrik. Yin dkk (2010) melaporkan tentang penggunaan kombinasi tiga matrik yang berbeda sebagai material pengikat untuk serat karbon dengan cara infiltrasi cairan bubuk titanium karbida (TiC) pada komposit berpori karbon/karbon. Dengan cara ini selama proses infiltrasi akan terjadi reaksi antara silikon (Si) dengan titanium karbida dan matrik karbon sehingga terbentuk komposit serat karbon bermatrik kombinasi karbon dan keramik, C/C-SiC-Ti₃SiC₂. Komposisi matrik tergantung lama waktu infiltrasi. Dibandingkan dengan komposit serat karbon/karbon, komposit yang dihasilkan ini memiliki kuat lengkung dan ketangguhan retak yang secara signifikan lebih tinggi.

4.2. Material Komposit Hibrid Serat Alami/Gelas-E

Thwe dan Liao (2002) meneliti sifat tarik dan lengkung komposit hibrid serat pendek bambu/serat pendek gelas/polipropilena. Panjang serat bambu dibuat empat variasi antara 0,25 sampai dengan 12 mm, sedangkan panjang serat gelas dengan dua variasi 3 dan 6 mm. Kedua jenis serat dicampur serta tersusun dan didistribusikan secara acak. Untuk meningkatkan kuat rekatan *interface* serat-matrik ditambahkan MAPP. Kekuatan dan modulus tarik diperoleh meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan serat bambu dari 10-30 wt%. Kuat tarik komposit serat bambu/polipropilena tanpa penambahan MAPP diperoleh antara ~16-17 MPa, dengan modulus ~2,05-2,08 GPa. Kandungan total serat untuk komposit hibrida dibuat tetap 30 wt% dengan 20 wt% serat bambu dan 10 wt% serat gelas. Diperoleh peningkatan kuat tarik dan lengkung sebesar 7 dan 25%, dengan peningkatan modulusnya masing-masing 12 dan 10%, dibandingkan dengan komposit serat bambu/polipropilena pada jumlah kandungan serat yang sama.

Rendahnya kekuatan dan modulus tarik dan lengkung yang diperoleh dapat disebabkan seratnya yang tidak kontinu dan tersusun secara

acak. Demikian juga peningkatan sifat-sifat tersebut dengan substitusi serat gelas yang relatif cukup banyak.

4.3. Material Komposit Hibrid Serat Ijuk/Gelas-E

Seperti telah dikemukakan di depan bahwa potensi serat alam Indonesia mencapai 164.389 ton per tahun. Sementara itu, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal dengan memanfaatkan potensi sifat-sifat mekanisnya. Pemanfaatannya baru sebatas untuk sapu, tali, atap dan material penapis untuk sanitasi.

Kuat tarik komposit bermatrik epoksi yang diperkuat dengan serat ijuk berorientasi acak dengan kadar ijuk 40 wt% mencapai sekitar 54,33 MPa dan ketangguhan impaknya mencapai 33,395 J/mm² (Widodo, 2008). Penelitian lain (Prasetyo, 2007) melaporkan bahwa material komposit bermatrik poliester yang diperkuat dengan serat ijuk memiliki kuat lengkung 62,76 MPa dengan modulus lengkung 1,269 GPa pada kandungan serat 40 vol%. Sementara itu, kuat tarik dan modulusnya mencapai 13,72 MPa dan 2,00 GPa.

Untuk meningkatkan sifat-sifat mekanisnya, serat ijuk sebagai penguat material komposit dapat dikombinasikan dengan serat sintetis yang berkekuatan jauh lebih tinggi. Sitorus (1996) mensubstitusi sebagian serat ijuk dengan serat gelas pada material komposit bermatrik poliester, dan dievaluasi kuat tarik dan ketangguhan impaknya. Dilaporkan bahwa diperoleh kuat tarik dan ketangguhan impak yang jauh lebih tinggi dari yang dilaporkan oleh Prasetyo (2007), yakni berturut-turut 56,04 MPa and 46,18 kJ/m². Sapuan dkk (2013) meneliti sifat-sifat tarik, lengkung dan impak komposit hibrid serat ijuk/glass bermatrik poliester. Mereka menggunakan serat kaca pendek beroriensi acak berbentuk *mat* dan ijuk dengan variasi perbandingan kandungannya.

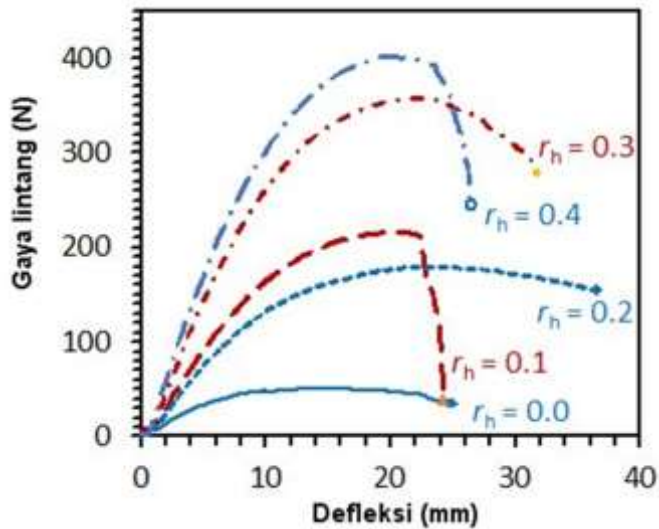
Walaupun beberapa penelitian tentang hibrid ijuk/serat kaca bermatrik polimer telah banyak dilakukan, namun masih sulit diperoleh yang

menyusun seratnya secara searah atau unidireksional yang kebanyakan karena alasan proses manufakturnya yang memerlukan ketelitian, kecermatan dan kesabaran. Pada kajian ini sebagai ilustrasi digunakan susunan serat pendek acak ijuk dan serat kaca searah dengan matrik poliester. Mengingat pembebanannya yang lengkung dengan beban utama berupa tekan pada satu muka, dan tarik searah panjang balok pada sisi lemahnya, maka dengan substitusi serat pada bagian lemah tersebut dengan serat kaca searah diharapkan potensi kuat tarik yang tinggi serat kaca tersebut dapat termanfaatkan secara maksimal.

Pengaruh angka hibridisasi terhadap daya dukung beban

Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3 berikut menunjukkan hubungan antara besar gaya lintang atau lateral (F) dengan penurunan atau defleksi yang terjadi (D) di titik pembebanan pada pengujian lengkungan tiga titik dengan variasi panjang balok, yakni $L/d = 16, 24$ dan 32 . Ketiga gambar tersebut menunjukkan hubungan $F-D$ yang *hampir linear* sampai dengan sekitar 50% dari gaya maksimumnya. Angka ini makin tinggi seiring dengan meningkatnya angka perbandingan hibridisasi r_h . Hal ini menunjukkan bahwa, walaupun tidak dominan, karakteristik matrik yang memiliki hubungan $\sigma-\varepsilon$ yang tidak linear. Juga terlihat pada ketiga gambar tersebut bahwa makin tinggi kadar serat gelasnya, r_h makin tinggi, maka grafiknya makin tegak yang menunjukkan kecenderungan naiknya modulus elastitas, sesuai dengan persamaan-persamaan (6) dan (7).

$L/d \sim 16$. Hubungan besar gaya lateral yang dapat diterima dengan besarnya defleksi atau penurunan untuk berbagai harga angka perbandingan hibridisasi untuk balok pendek, $L/d = 16$, ditunjukkan pada Gambar 4.1. Secara umum dapat dikatakan bahwa substitusi sebagian serat gelas kontinu untuk sebagian serat pendek acak ijuk pada permukaan pembebanan tariknya dapat menaikkan

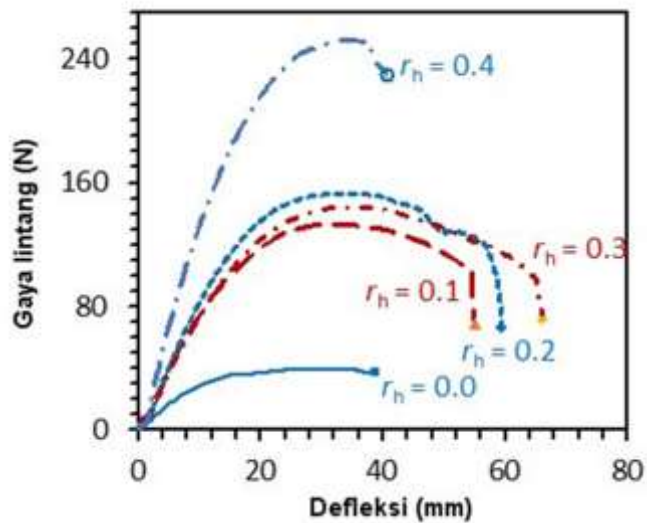


Gambar 4.1. Hubungan gaya lateral dengan penurunan untuk balok pendek, $L/d \sim 16$. (Sudarisman dkk., 2018)

kemampuannya menerima gaya lateral. Makin banyak yang disubstitusi, sampai dengan 40 vol%, makin besar gaya lateral yang dapat diterimanya kecuali pada substitusi sebesar 20 vol%.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa besar gaya lateral naik dari $\sim 81,5$ N untuk komposit serat ijuk searah/poliester ($r_h = 0,0$) menjadi $\sim 381,5$ N untuk $r_h = 0,4$. Kenaikan besar gaya lateral bervariasi antara $\sim 120\%$ pada $r_h = 0,2$ sampai dengan $\sim 368\%$ pada $r_h = 0,4$ dibandingkan dengan besar gaya lateral yang dapat diterima oleh balok komposit serat pendek acak ijuk/poliester yang digunakan sebagai perbandingan.

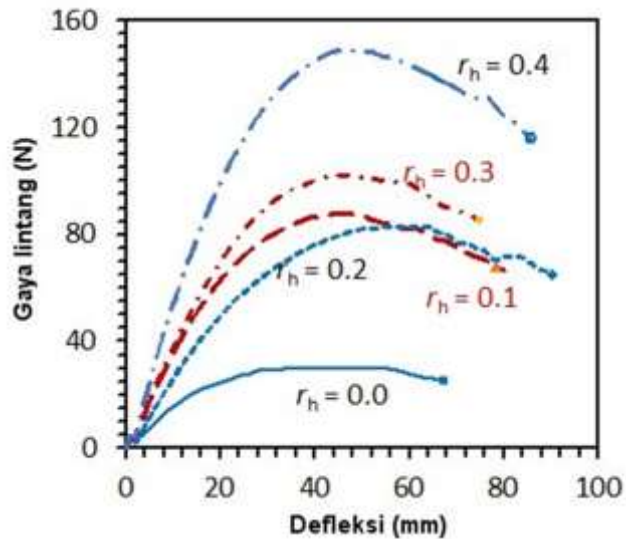
$L/d \sim 24$. Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara besar gaya lateral dengan defleksi yang terjadi untuk balok yang lebih panjang, $L/d \sim 24$ untuk angka perbandingan hibridisasi yang berbeda-beda. Terlihat bahwa substitusi serat gelas kontinu untuk sebgain serat pendek acak ijuk menaikkan daya dukung bebannya. Besar beban meningkat seiring dengan naiknya r_h .



Gambar 4.2. Hubungan gaya lateral dengan penurunan untuk balok panjang, $L/d \sim 24$. (Sudarisman dkk, 2018)

Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa pada kenaikan r_h dari 0,0 menjadi 0,1 menghasilkan kenaikan besar gaya lateral dari $\sim 58,2$ N menjadi $\sim 134,7$ N atau kenaikan sebesar $\sim 131\%$. Penambahan jumlah serat gelas sampai dengan ~ 40 vol% menghasilkan besar gaya lateral yang dapat diterima sebesar $\sim 249,7$ N atau kenaikan sebesar $\sim 329\%$ dibandingkan dengan gaya lateral yang dapat diterima balok komposit serat pendek acak ijuk/poliester, yakni pada $r_h = 0,0$.

$L/d \sim 32$. Grafik F-D untuk balok panjang, $L/d \sim 32$, untuk berbagai harga r_h ditunjukkan pada Gambar 4.3. Pada gambar dapat dilihat bahwa besar gaya lintang meningkat seiring dengan makin banyaknya serat gelas yang disubstitusikan. Kenaikan besar gaya lateral sebesar $\sim 180\%$ (dari $\sim 31,1$ N menjadi $\sim 87,2$ N) dapat diperoleh dengan substitusi sebesar 10 vol% kandungan total serat saja. Kenaikan selanjutnya sampai dengan ~ 40 vol% akan menaikkan besar gaya lateral yang dapat diterima dari $\sim 31,1$ N pada $r_h = 0,0$ menjadi $\sim 144,4$ N pada $r_h = 0,4$, atau kenaikan sebesar $\sim 364\%$.



Gambar 4.3. Hubungan gaya lateral dengan penurunan untuk balok terpanjang, $L/d \sim 32$. (Sudarisman dkk, 2018)

Mengingat bahwa bentuk dan ukuran penampang lintang balok relatif tetap, maka pola kenaikan kuat lengkung balok juga akan sangat mirip dengan pola kenaikan besar gaya lintang yang dapat diterima balok masing-masing. Dengan demikian, substitusi ~ 40 vol% serat gelas kontinu untuk serat pendek acak ijuk diharapkan dapat menaikkan kuat lengkung balok komposit serat pendek acak ijuk sampai dengan $\sim 364\%$ untuk balok yang panjang.

Dari data pada Gambar 4.1 – 4.3, selanjutnya dengan menggunakan persamaan-persamaan (3) – (8) yang sesuai, akan diperoleh bahwa kuat lengkung tertinggi untuk masing-masing panjang balok adalah pada $r_h = 0,4$ sesuai dengan gaya lateral yang dapat diterima adalah yang paling besar. Besar tegangan lengkung tersebut adalah 170,6 MPa, 220,0 MPa dan 231,8 MPa berturut-turut untuk $L/d = 16, 24$ dan 32. Ternyata bahwa untuk balok yang panjang, $L/d > 16$, besar kuat lengkung tersebut mendekati kuat lengkung komposit hibrid serat *jute*/gelas bermatrik epoksi pada $r_h = 0,5$ seperti yang dilaporkan oleh Sanjaya and Yogesha (2016).

Moda gagal



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.4. Moda gagal komposit serat ijuk searah/poliester ($r_h = 0,0$): (a) $L/d = 16$, (b) $L/d = 24$, (c) $L/d = 32$ (Sudarisman dkk, 2018)

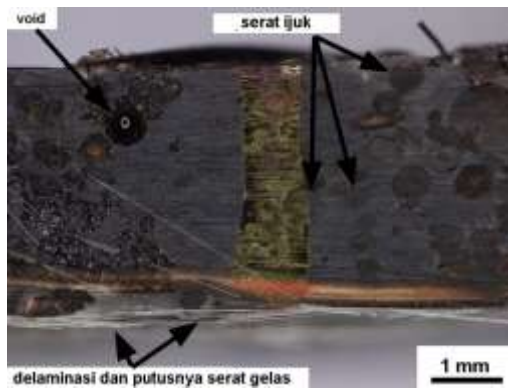
Gambar 4.4 sampai dengan 4.6 pada halaman berikut menunjukkan bahwa moda gagal dapat diklasifikasikan menjadi dua yang satu dengan yang lainnya jelas perbedaannya. Yang pertama adalah moda gagal komposit serat pendek acak ijuk/poliester ($r_h = 0,0$), dan yang kedua adalah moda gagal komposit hibrid serat pendek acak ijuk/serat kontinu gelas/poliester yang dalam kajian ini $0,1 \leq r_h \leq 0,4$.

Moda patahan yang pertama ditunjukkan pada Gambar 4.4. Terlihat pada Gambar 4.4 bahwa untuk ketiga L/d yang berbeda, $L/d = 16, 24$ dan 32 , dihasilkan moda gagal yang sangat mirip, yakni retak melintang yang berawal pada permukaan sisi tariknya pada permukaan bawah merambat ke arah sisi tekannya pada permukaan atas sampai dengan terjadi patah. Moda gagal ini berbeda dengan yang terjadi pada komposit yang diperkuat serat sintetis yang berkekuatan tinggi yang menerima pembebanan lenturan tiga titik. Balok komposit ini akan mengalami kegagalan berawal pada permukaan tekannya berupa tekukan lokal serat yang menyebabkan terjadinya *kinking* akibat kuat tekannya yang lebih rendah dari pada kuat tarikannya (Dong and Davies, 2012). Balok komposit serat pendek acak ijuk/poliester ini mengalami kegagalan yang berawal pada permukaan sisi tariknya merambat ke sisi tekannya seperti yang terjadi pada komposit yang diperkuat serat alami berkekuatan relatif rendah pada umumnya seperti yang dilaporkan oleh Yan dan Chouw (2014) pada balok beton yang diperkuat dengan serat sabut kelapa.

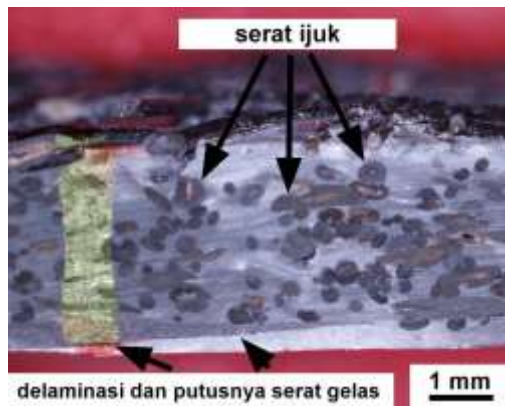
Moda gagal balok komposit hibrid serat pendek acak ijuk/serat searah gelas bermatrik poliester ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan 4.6 pada halaman berikut. Gambar-gambar 4.5(a) sampai dengan 4.6(c) menunjukkan kemiripan pola moda patah walaupun panjang baloknya berbeda-beda. Gambar-gambar tersebut menunjukkan bahwa dengan substitusi parsial serat gelas searah untuk serat pendek acak ijuk terjadi perubahan moda gagal dari seperti yang terlihat pada Gambar 4.4 yang berawal pada permukaan tarik dan merambat cepat ke sisi tekannya menjadi terhambat akibat naiknya besar beban tarik yang dapat diterima serat gelas kontinu searah. Pada Gambar 4.5 dan 4.6 terlihat bahwa pada antar muka lapisan komposit serat pendek acak ijuk/



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5. Moda gagal balok komposit hibrid serat pendek acak ijuk/serat gelas kontinu searah/poliester: (a) $S/d = 16$ and $r_h = 0,1$, (b) $S/d = 24$ and $r_h = 0,2$ dan (c) $S/d = 32$ and $r_h = 0,1$.

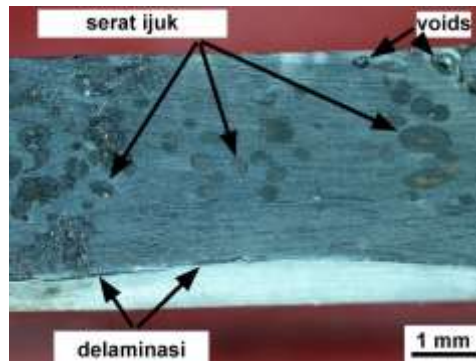
(Sударisman dkk., 2018)



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6. Moda gagal balok komposit hibrid serat pendek acak ijuk/serat gelas kontinu searah/poliester: (a) $S/d = 16$ and $r_h = 0,3$, (b) $S/d = 24$ and $r_h = 0,4$ dan (c) $S/d = 32$ and $r_h = 0,4$. (Sudarisman dkk., 2018)

poliester-serat gelas kontinu searah balok komposit hibrid serat pendek acak ijuk/serat gelas kontinu searah terjadi delaminasi yang diduga akibat diskontinuitas yang menimbulkan tegangan geser antar-lapis yang besar pada antar-muka tersebut. Mengingat bahwa modulus elastisitas material komposit serat gelas/poliester (72,83 GPa) jauh lebih tinggi dari modulus elastisitas material komposit serat ijuk/poliester (3,69 GPa) (Sapuan et al, 2013), maka ketika lapisan komposit serat gelas kontinu searah mengalami putusannya serat (*fiber breakage*) maka regangan yang terjadi pada area tersebut belum cukup besar untuk mengawali terjadinya retak melintang seperti yang terlihat pada Gambar 4.5(a). Akan tetapi tegangan geser yang terjadi pada bidang tersebut sudah cukup besar untuk mengawali terjadinya retak memanjang yang menimbulkan terjadinya delaminasi seperti ditunjukkan anak panah hitam pada Gambar 4.5(b), 4.5(c) dan 4.6(b).

Substitusi serat gelas kontinu searah untuk sebagian serat pendek ijuk pada sisi tariknya akan mengubah moda gagal balok komposit serat pendek acak ijuk, yakni retak melintang yang berawal pada sisi tariknya, menjadi delaminasi antar lapisan seperti yang dilaporkan oleh Sudarisman dkk (2009b).

Selain peningkatan besar gaya lateral yang mampu diterima balok dengan naiknya jumlah serat gelas yang disubstitusikan, pada setiap Gambar 4.1, 4.2 maupun 4.3 juga terlihat bahwa besar penurunan atau defleksi yang terjadi relatif tidak berubah dengan naiknya jumlah serat gelas yang disubstitusikan. Hal ini berarti jumlah energi yang dapat diserap yang direpresentasikan oleh luas daerah di bawah grafik *F-D* juga bertambah besar. Besar defleksi untuk mencapai kondisi gagal (*fail*) yang relatif tidak berkurang berarti tidak berkurangnya waktu sejak tanda-tanda kegagalan (*initial failure*) sampai dengan runtuhnya (*collapse*) suatu struktur juga tidak berkurang. Dengan demikian, dalam hal terdeteksi gejala runtuh maka waktu yang tersedia untuk evakuasi tidak berkurang.

Dengan substitusi parsial serat pendek acak ijuk pada sisi pembebanan tarik balok komposit serat pendek acak ijuk/poliester dengan serat gelas kontinu, sifat-sifat lengkung balok tersebut dapat ditingkatkan.

5.1. Moda Gagal

Dengan substitusi serat gelas kontinu searah untuk sebagian serat pendek acak ijuk pada sisi tarik suatu balok komposit berpenguat serat pendek acak ijuk bermatrik poliester berubah dari moda gagal retak melintang yang berawal dari permukaan sisi tariknya merambat menuju sisi tekannya menjadi moda gagal yang diawali dengan timbulnya delaminasi pada antar-muka lapisan komposit serat pendek acak ijuk/poliester-komposit serat gelas searah diikuti putusya serat gelas akibat bebannya yang besar dan kemudian baru terjadi retak awal pada lapisan komposit serat pendek acak ijuk/poliester. Tingginya tegangan geser pada antar-muka lapisan tersebut dapat disebabkan oleh adanya diskontinuitas, terutama perbedaan yang sangat ekstrim antara modulus elastitas komposit serat pendek acak ijuk/poliester (3,69 GPa) dengan modulus elastisitas komposit serat gelas kontinu (72,83 GPa).

5.2. Kuat Lengkung

Peningkatan kemampuan menerima gaya lateral diperoleh bervariasi dengan divarisinya perbandingan panjang bentang balok terhadap tebalnya. Untuk balok pendek, $L/d = 16$, diperoleh kenaikan antara 120% sampai dengan 368% masing-masing untuk substitusi serat gelas sebanyak 10 vol% dan 40 vol%. Untuk $L/d = 24$ diperoleh kenaikan yang bervariasi antara 131% sampai dengan 329% masing-masing pada substitusi serat gelas sebanyak 20 vol% dan 40 vol%. Sedangkan pada $L/d = 32$ diperoleh kenaikan antara 180% sampai dengan 364% masing-masing untuk substitusi serat gelas sebesar 10 vol% dan 40 vol%. Mengingat untuk setiap harga L/d diperoleh harga defleksi yang terjadi relatif tidak signifikan berbeda, serta bentuk dan ukuran spesimennya yang sangat seragam sesuai dengan kaidah standar yang digunakan, maka menurut persamaan-persamaan (4a) dan (4b) dapat diharapkan akan diperoleh kenaikan kuat lengkung yang nilainya sangat dekat dengan kenaikan besar gaya lateral yang dapat diterima tersebut.

5.3. Modulus Elastisitas Lengkung

Modulus elastisitas lengkung juga jauh meningkat dibandingkan dengan balok referensinya, yakni balok komposit serat pendek acak ijuk/poliester. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 6, 7 dan 8. Dengan makin tegaknya grafik $F-D$, maka akan diperoleh harga m menurut persamaan (7) yang lebih besar. Sedangkan pada L/d yang sama spesimen memiliki geometri yang hampir sama, atau tidak berbeda secara signifikan, walaupun harga r_h -nya yang berbeda-beda. Dengan demikian, maka naiknya harga m akibat substitusi serat gelas kontinu akan menghasilkan modulus elastisitas lengkung menurut persamaan (6) yang meningkat pula.

5.4. Kapasitas Penyerapan Energi

Kapasitas penyerapan energi suatu grafik $F-D$ hasil pengujian lengkung dinyatakan oleh luas daerah di bawah grafik tersebut. Dengan demikian, dari Gambar 6, 7 dan 8 juga terlihat bahwa seiring dengan penambahan jumlah serat gelas kontinu, luasan di bawah grafik juga meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas penyerapan energi balok tersebut meningkat. Karena luas penampang lintang balok juga relatif seragam, maka kapasitas penyerapan energi spesifik juga meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan serat gelas kontinu searah yang disubstitusikan untuk serat pendek acak ijuk.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal B.D., Broutman L.J. dan Chandrashekhara, K., 2018, Analysis and Performance of Fiber Composites, 4th ed., Chichester: John Wiley and Sons, Inc.
- Amer M.S., dan Schadler L.S., 1987, Stress concentration phenomenon in graphite/epoxy composites: Tension/compression effects," *Composites Science and Technology***57(8)**: 1129-1137.
- Arshad K. dan Mujahid M., 2011, Biodegradation of textile materials, *M.S. Thesis*, Boras: University of Boras.
- Ashby M.F., 2011, 1. Introduction, dalam buku *Materials Selection in Mechanical Design*, Ashby M.F., Fourth ed., Amsterdam: Elsevier, 1-10.
- Ashby M.F. dan Jones D.R.H., 2000, Engineering materials and their properties, dalam buku *Engineering Materials 1: An Introduction to Their Properties and Applications*, Ashby M.F. dan Jones D.R.H., Oxford: Butterworth-Heinemann, 3-14.
- Auerkari P., 1996, Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics, *Research Report*, Technical Research Centre of Finland.
- Azo Materials, 2018, Magnesia - Magnesium Oxide (MgO): Properties & Applications. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=54>, access date: 21 Agustus 2018.
- Bader M.G., dan Bowyer W.H., 1973, An improved method of production for high strength fibre-reinforced thermoplastics, *Composites***4(4)**: 150-156.
- Baillargeon Y., dan Vu-Khanh T., 2001, Prediction of fiber orientation and microstructure of woven fabric composites after forming, *Composite Structures***52**: 475-481.

- Barbero E.J., 1998, 46. Construction, dalam buku *Handbook of Composites*, S.T. Peters (Ed.) Ed. 2, London: Chapman and Hall: 982-1003.
- Begum K. dan Islam M.A., 2013, Natural Fiber as a Substitute to Synthetic Fiber in Polymer Composites: A Review. *Research Journal of Engineering Sciences* **3**: 46-53.
- BP Amoco Chemicals, 2008, Typical Properties for Thornel(R) Carbon Fibers - Standard Products. Alpharetta, GA, U.S.A.: BP Amoco Chemicals, <http://www.cytotec.com/engineered-materials/downloads/ThornelTP.pdf>. Diakses tanggal: 10 November 2008.
- Botelho E.C., Figiel L., Rezende M.C., dan Lauke B., 2003, Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites, *Composites Science and Technology* **63**: 1843-1855.
- Bray J.W., 1996, Aluminum mill and engineered wrought product, dalam buku *ASM Handbook*. vol. 2. *Properties and Selection: Non-ferro alloys and special purpose materials*, S.R. Lampman, T.B. Zorc, S.D. Henry, J. Daquila, A.W. Ronkie, J. Jakel, K.L. O'Keefe, L.A. Abel, R.T. Kiepora, P.T. Heather, F. Lampman, and N.D. Weaton, (Eds.), Materials Park: ASM International: 29-61.
- Callister W.D., 2007, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7th ed. Danvers: John Wiley and Sons.
- Capozucca R., 2007, Analysis of the experimental flexural behaviour of a concrete beam grid reinforced with C-FRP bars, *Composite Structures* **79**: 517-526.
- Chattopadhyay S.K., Khandal R.K., Uppaluri R. dan Ghoshal A.K., 2010, Mechanical, thermal, and morphological properties of maleic anhydride-g-polypropylene compatibilized and chemically modified banana-fiber-reinforced polypropylene composites, *Journal of Applied Polymer Science* **117**: 1731-1740.
- Chattopadhyay S.K., Khandal R.K., Uppaluri R. dan Ghoshal A.K., 2011, Bamboo Fiber Reinforced Polypropylene Composites and

- Their Mechanical, Thermal, and Morphological Properties, *Journal of Applied Polymer Science***119**: 1619-1626.
- Chawla K.K., 1987, Composite Materials: Science and Engineering. New York: Springer-Verlag.
- Davies I.J. dan Hamada H., 2001, Flexural properties of a hybrid composite containing carbon and silicon carbide fibres, *Advanced Composite Materials***10**: 77-96.
- Daniel I.M. dan Ishai O., 1994, Engineering Mechanics of Composite Materials, First ed. New York: Oxford University Press.
- Deng S., Ye L., dan Mai Y.-W., 1999, Influence of fibre cross-sectional aspect ratio on mechanical properties of glass fibre/epoxy composites I. Tensile and flexure behaviour, *Composites Science and Technology***59**: 1331-1339.
- Denton D.L., 1998, Land transportation application, dalam buku *Handbook of Composites*, S.T. Peters (Ed.) Ed. 2, London: Chapman and Hall: 905-915.
- Department of Defense, USA, 2002, Volume 5. Ceramic matrix composites, *Composite Materials Handbook*.
- Department of Environment and Conservation, Western Australia, <https://www.kabc.wa.gov.au/library/file/Fact%20sheets/How%20long%20Fact%20sheet%20KAB.pdf>, accessed date: 20 Agustus 2018.
- Derry T.K. dan Williams T.I., 1970, The extraction and working of metals, dalam buku *A Short History of Technology*, Derry T.K. dan Williams T.I., Oxford: Oxford University Press, 114-156.
- Devi L.U., Bhagawan S.S. dan Thomas S., 1997, Mechanical Properties of Pineapple Leaf Fiber-Reinforced Polyester Composites, *Journal of Applied Polymer Science***64(9)**: 1739-1748.
- Diharjo K., Permana A., Arsada R., Asmoro G., Budiono H.S. dan Firdaus Y., 2016, Effect of Acetylation Treatment and Soaking

Time to Bending Strength of Sugar Palm Fiber Composite, *Proceedings: International Conference on Engineering, Science and Nanotechnology 2016 (ICESNANO 2016)*, Surakarta, 3-5 Agustus: 030049-1 – 5.

- Divya H.V., Naik L.L, YogeshaB., 2016, Processing Techniques of Polymer Matrix Composites – A Review, *International Journal of Engineering Research and General Science* 4(3): 357-363.
- Dong C., dan Davies I.J., 2012, Flexural properties of glass and carbon fiber reinforced epoxy hybrid composites, *Designs and Applications* 227(4): 308-317.
- Dowling N.E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials*. Englewood Cliff: Prentice Hall.
- Drzal L.T., 2001, Interfaces and interphases, dalam buku *ASM Handbook*, vol. 21: Composites, Miracle D.B. dan Donaldson S.L. (Eds.). Materials Parks: ASM International: 169-179.
- Elam S., Effinger M., Holmes R., Lee J. dan Jaskowiak M, 2000, *Prosiding: 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Huntsvill, 17-19 July: 1-10.
- Florea R.M. dan Carcea I., 2012, Polymer matrix composites – routes and properties, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* IV(1): 59-64.
- FRP Services and Company, *General Purpose Polyester Laminating Resin 268BQT, 268BQTN, 268QT, 268QTN*,
- Fukuda H., 1999, Professor Hayashi's brilliant activities in composites research, *Advanced Composite Materials* 8: 207-215.
- Gerasimchuk O.M., Sergienko G.A., Bondarchuk V.I., Terukov A.V., Nalimov Y.S., dan Gryaznov B.A., 2006, Fatigue strength of an ($\alpha+\beta$)-type titanium alloy Ti-6Al-4V produced by the electron beam physical vapor deposition method," *Strength of Materials* 38: 651-658.

- Gibbs-Smith C.H., 1970, *Aviation: An Historical Survey from Its Origins to the End of World War II*, London: Her Majesty's Stationery Office.
- Gilchrist M.D., Kinloch A.J. dan Matthews F.L., 1996, Mechanical performance of carbon-fibre and glass-fibre-reinforced epoxy I-beams: II. Fractographic failure observations, *Composites Science and Technology***56(9)**: 1031-1045.
- Golbabaie M., 2006, Applications of Biocomposites in Building Industry, Department of Plant Agriculture, University of Guelph, Ontario.
- Greenhalgh E. S., 1993, Mechanical evaluation of carbon fibre reinforced thermoplastic I-beams, *DRA TR 92071*, Farnborough, U.K.
- Gustin J., Joneson A., Mahinfalah M. dan Stone J., 2005, Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites, *Composite Structures***69**: 396-406.
- Hadcock R.N., 1998, Aircraft applications, dalam buku *Handbook of Composites*, S.T. Peters (Ed.) Ed. 2, London: Chapman and Hall: 1044-1052.
- Hamada H., Coppola J.C., dan Hull D., 1992, Effect of surface treatment on crushing behaviour of glass cloth/epoxy composite tubes, *Composites* **23(2)**: 93-99.
- Hawthorne H.M. dan Teghtsoonian E., 1975, Axial compression fracture in carbon fibre, *Journal of Materials Science***10**: 41-51.
- Hsueh C.-H., 1996, Crack-wake interfacial debonding criteria for fiber-reinforced ceramic composites, *Acta Materialia***44**: 2211-2216.
- <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/props.html>, diakses tanggal: 21 Agustus 2018.
- Hujuri, U., Chattopadhyay, S.K., Uppaluri, R. dan Ghoshal, A.K., 2008, Effect of maleic anhydride grafted polypropylene on the

- mechanical and morphological properties of chemically modified short-pineapple-leaf-fiber-reinforced polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science***107(3)**: 1507-1516.
- Joseph P.V., Kuruvilla J. dan Thomas S., 1999, Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal fiber-reinforced polypropylene composites, *Composite Science Technology* **59**: 1625-1640.
- Kalaprasad G., Joseph K. dan Thomas S., 1999, Theoretical modeling of tensile properties of short sisal fiber reinforced low-density polyethylene composites, *Journal of Material Science***32**: 4261-4267.
- Khalid Y.A., Ali F.A., Sahari B.B. dan Saad E.M.A., 2005, Performance of composite I-beams under axial compression and bending load modes, *Materials & Design***26(2)**: 127-135.
- Lafdi K., dan Wright M.A., 1998, 9. Carbon fibers, dalam buku *Handbook of Composites*, Second ed, S.T. Peters, Ed. London: Chapman and Hall: 169-201.
- Li L, Frey M. dan Browning K.J., 2010, Biodegradability study on cotton and polyester fabric, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics***5(4)**: 42-53.
- Liu F., Deng S, dan Zhang J., 2017, Mechanical Properties of Epoxy and Its Carbon Fiber Composites Modified by Nanoparticles, *Journal of Nanomaterials*.
- Loud S.N., 1998, 63. Commercial and industrial application of composites, dalam buku *Handbook of Composites*, S.T. Peters (Ed.) Ed. 2, London: Chapman and Hall: 931-956.
- Maleque M.A., Belal F.Y., Sapuan S.M., 2007, Mechanical properties study of pseudo-stem banana fiber-reinforced epoxy composite, *The Arabian Journal for Science and Engineering***32(2B)**: 359-364.

- Mall S. dan Cunningham S.R., 2007, Fatigue behavior of integrally fabricated joints between titanium matrix composite and titanium alloy, *Composite Structures***80**: 65-72.
- Mansor M.R., Sapuan S.M., Hambali A., Zainudin E.S., dan Nuraini A.A., 2014, Materials selection of hybrid bio-composites thermoset matrix for automotive bumper beam application using Topsis method, *Advances in Environmental Biology***8(8)**: 3138-3142.
- Mardiansyah D., Triyana K., Sosiati H., dan Harsojo, 2016, Synthesis of copper nanorods by aqueous solution method without heating external. *Proceedings: Advances of Science and Technology for Society*, AIP Conference 1755(1): 150019.
- Matthews F.L., 2000, Part 1. Overview and review of composite materials, dalam buku *Finite Element Modelling of composite materials and structures*, F.L. Matthews, G.A.O. Davies, D. Hitchings, and C. Soutis (Editor), 1 ed., Boca Raton: CRC Press, 1-40.
- Mazumdar S.K., 2002, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, Boca Raton: CRC Press.
- Megson T.H.G., 1972, Chapter 7. Principles of stressed-skin construction, dalam buku *Aircraft Structures for Engineering Students*, London: Edward Arnold: 197-224.
- Misson M.L., Islam M.M., Epaarachchi J.A. dan K-T. Lau, 2014, Potentiality of utilizing natural textile materials for engineering composites applications. *Materials and Design***59**: 359-368.
- Munandar, I., Savetlana, S., and Sugiyanto, 2013, Kekuatan tarik serat ijuk (Arenga Pinnata Merr) (Tensile strength of sugar palm fibers), *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin FEMA***1(3)**: 52-58.
- Mussig J., 2010, 19.1. Historical, Contemporary and Future Applications, dalam buku *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*, Mussig J., Chichester: John Wiley & Sons: 385-397.

- Netravali A.N., Schwartz P., dan Phoenix S.L., 1989, Study of interfaces of high performance glass fibres and DGEBA based epoxy resins using single-fibre-composite test, *Polymer Composites***10**: 385-388.
- Netravali A.N., Henstenburg R.B., Phoenix S.L., dan Schwartz P., 1989, Interfacial shear strength studies using the single filament composite test. I: Experiment on graphite fiber in epoxy, *Polymer Composites***10**: 226-241.
- Nurdina R.D., 2016, Potensi Aren (Arenca pinnata, MERR) di Jawa Barat.
[\[http://disbun.jabarprov.go.id/bptp/id/postdetail/66/Potensi-Aren-andArenca-pinnataand-MERRand-di-Jawa-Barat\]](http://disbun.jabarprov.go.id/bptp/id/postdetail/66/Potensi-Aren-andArenca-pinnataand-MERRand-di-Jawa-Barat). Diakses tanggal: 7 Agustus 2017.
- Okubo K., Fujii T. and Yamamoto Y., 2004, Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties, *Journal of Composite Part A*, **35**: 377-383.
- Ogasawara T., Aizawa S., Ogawa T., and Ishikawa T., 2007, Sensitive strain monitoring of SiC fiber/epoxy composite using electrical resistance changes, *Composites Science and Technology***67**: 955-962.
- Oya N. dan Hamada H., 1996, Effect of reinforcing fibre properties on various mechanical behavior of unidirectional carbon/epoxy laminates, *Science and Engineering of Composite Materials***5**: 105-129.
- Pan N., 1993, Theoretical determination of the optimal fiber volume fraction and fiber-matrix property compatibility of short fiber composites, *Polymer Composites***14(2)**: 85-93.
- Pemda Jawa Barat, 2013, RPJMD Provinsi Jawa Barat Tahun 2013-2018. Bandung: Pemda Jabar.
- Pemkab Temanggung, 2008, Mengembalikan kejayaan aren di Temanggung. Diakses tanggal: 23 Maret 2014.

- Penn L.S. dan Wang H., 1998, 3. Epoxy resins, dalam buku *Handbook of Composites*, Second ed, S.T. Peters (Ed.), London: Chapman and Hall: 48-74.
- Piggott M.R., dan Andison D., 1987, The carbon fibre-epoxy interface, *Journal of Reinforced Plastics and Composites***6**: 290-302.
- Prasetyo, A.A., 2007, Analisa pengaruh fraksi volume serat aren (*Arenga Pinnata Merr.*) dengan matrik polyester terhadap kekuatan bending dan Tarik, *Skripsi SI*. Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.
- Proemper E., 2006, New automotive interior parts from natural fiber materials, *Abstract Proceedings: 7th International AVK-TV Conference for Reinforced Plastics and Thermoset Moulding Compounds*, Baden-baden, 28-29th September: B.8.
- Rao K.M.M., dan Rao K.M., 2007, Extraction and tensile properties of natural fibres: vakka, date and bamboo, *Composite Structures***77**: 288-295.
- Rawal, S., 2001, Metal matrix composites for space applications, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)***53(4)**: 14-17.
- Reder C., Loidl D., Puchegger S., Gitchthaler D., Paterlik H., Kromp K., Khatibi G., Betzwar A., Zimprich P., dan Weiss B., 2003, Non-contacting strain measurement of ceramic and carbon single fibres by using the laser speckle method, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing***34**: 1029-1033.
- Reinhardt T.J. dan Clements L.L., 1989, Introduction to composites, dalam buku *Engineered Materials Handbook*, vol. 1, Composites, Conshohoken: ASM International, 1989, 28-34.
- Rosler J., Harders H. dan Baker M., 2007, Mechanical Behaviour of Engineering Materials. New York: Springer-Verlag.
- RV-Groovin.com, <http://www.rv-groovin.com/fundamaterials.html>, *Aircraft Fundamentals: Aircraft Materials*, Diakses tanggal: 04 September 2008.

- Sabari, I., 2009, *Pengaruh Fraksi volume Serat Terhadap Kekuatan Tarik, harga impack dan kemampuan serapan Bunyi dari Komposit Serat sabut kelapa anyaman 3D, Tugas akhir S1*, Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Sanjay M.R., and Yogesha B., 2016, Studies on Mechanical Properties of Jute/E-Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites, *Journal of Minerals and Material Characterization and Engineering***4**: 15-25.
- Santhiarsa I.G.N.N., 2016, Effects of Alkaline Treatment and Fiber Length towards The Static and Dynamic Properties of Ijuk Fiber Strengthened–Epoxy Composite, *Proceedings: International Mechanical Engineering and Engineering Education Conferences (IMEEEEC 2016)*, Malang, 7-8 Oktober: 030022-1 - 030022-6.
- Santos E.B.C., Moreno C.G., Barros J.J.P., de Moura D.A., Fim F.C., Ries A., Wellen R.M.R., da Silva L.B., 2018, Effect of Alkaline and Hot Water Treatments on the Structure and Morphology of Piassava Fibers, *Materials Research***21(2)**: 1-11.
- Sapuan S.M., Lok H.Y., Ishak M.R., and Misri S., 2013, Mechanical properties of hybrid glass/sugar palm fibre-reinforced unsaturated polyester composites, *Chinese Journal of Polymer Science***31(10)**: 1394–1403.
- Selby K. dan Miller L.E., 1975, Fracture toughness and mechanical behaviour of an epoxy resin, *Journal of Materials Science***10**: 12-24.
- Seng J.M., 1998, 30. Laminate design, dalam buku *Handbook of Composites*, Second ed, S. T. Peters, Ed. London: Chapman and Hall: 686-708.
- Senne J.L., 2000, Fatigue Life of Hybrid FRP Composite Beams, *M.S. Thesis*, Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Seo S.I., Park C.S., Kim K.H., Sin B.C. dan Min A.K., 2005, Fatigue strength evaluation of the aluminum carbody of urban transit unit

- by large scale dynamic load test, *JMSE International Journal Series A*: **48**: 27-34.
- Shackelford J.F. dan Alexander W., 2001, *Materials Science and Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press.
- Sheeley M.Y., 1999, Epoxy resins, dalam buku *Polymer Data Handbook*, J.E. Mark, (Ed.), New York: Oxford University Press: 90-96.
- Sidwell D.R., 1998, 16. Hand lay-up and bag molding, dalam buku *Handbook of Composites*, Second ed, S.T. Peters, Ed. London: Chapman and Hall: 352-377.
- Silva J.F., Nunes J.P., Duro A.C. dan Castro B.F., 2013, Processing and properties of natural fibers reinforced thermoplastic and thermosetting composites, *Proceedings: The 19th International Conference on Composite Materials*, Montreal, 28 July - 2 August: 8626-8637.
- Sitorus, J. Komposit Hibrid Serat Panjang Gelas-Ijuk Dengan Matriks Polimer (Hybrid continuous glass/sugar palm fiber-reinforced polymer composites). *B.S. Thesis*. USU Medan, 1996.
- Spencer B.E., 1998, Composites in the sporting goods industry," dalam buku S.T. Peters (Ed.) *Handbook of Composites Ed.2*, London: Chapman and Hall: 1044-1052.
- Sport bicycle catalog, 2017, Bridgestone Cycle Co.,Ltd., Japan.
- Srivastava V.K., 1999, Influence of water immersion on mechanical properties of quasi-isotropic glass fibre reinforced epoxy vinylester resin composites, *Materials Science and Engineering A***263**: 56-63.
- Sudarisman, 2006, Sifat-sifat kekuatan tarik PMC dengan kandungan serat alam, *Jurnal Teknologi Academia ISTA***10(2)**: 271-280.
- Sudarisman, Davies I.J. dan Hamada H., 2007, Compressive failure of unidirectional hybrid fibre-reinforced epoxy composites

- containing carbon and silicon carbide fibres, *Composites Part A: Science and Engineering***38(3)**: 1070-1074.
- Sudarisman dan Davies I.J., 2008, Flexural failure of unidirectional hybrid fibre-reinforced polymer (FRP) composites containing different grades of glass fibre, *Advanced Materials Research***41-42**: 357-362.
- Sudarisman, 2009, Flexural behaviour of hybrid fibre-reinforced polymer composites, *Ph.D. Thesis*, Perth: Curtin University of Technology.
- Sudarisman, de san Miguel B., dan Davies I.J., 2009a, Effect of partial substitution of E-glass fibre for carbon fibre on the mechanical properties of CFRP Composites, *Proceedings: ICOMMET, Surabaya 24-25 Juni*: MI-125-MI-128.
- Sudarisman, de san Miguel B., dan Davies I.J., 2009b, Failure mechanism of unidirectional hybrid FRP composites, ICOMMET, *Proceedings: ICOMMET, Surabaya 24-25 Juni*: F6-F10.
- Sudarisman, Rahman M.B.N., dan Ishaq I.M., 2013, Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Diameter Serat Terhadap Kuat Geser Rekatan pada Antar-muka Serat Sabut Kelapa-Poliester, *Abstract Proceeding: Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*, Bandar Lampung, 22-23 Oktober: 151.
- Sudarisman, Kamiel B.P. dan Rahadi S., 2014, Sifat-sifat tarik dan flexural komposit serat sabut kelapa unidireksional-poliester, *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika***17(2)**: 166-175.
- Sudarisman, Rahman M.B.N., Hidayat A.R., 2015, Tensile and flexural properties of bamboo (*Gigantochloa*) apus fiber/epoxy green composites. *Applied Mechanics and Materials***758**: 119-123.
- Sudarisman, Isdiyanto S. dan Rahman M.B.N., 2018, Load bearing capacity of hybrid sugar palm/glass fiber-reinforced polyester

composites, *Proceedings: The 12th SEATUC*, Yogyakarta, 12-3 Maret: OS07-05.

Suddel B.C.dan Evans W.J., 2003,The increasing use and application of natural fiber composite materials within the automotif industry*Proceedings: 7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, Madison,May 19-20: 7-14.

Sun Y., dan Singh R.N., 2000, A technique for the determination of interfacial properties from debond length measurement, *Journal of Materials Science* **35**: 5681 – 5690.

Surdia T. dan Saito S., 1999, Pengetahuan Bahan Teknik, Jakarta: Pradnya Paramita.

Sutherland L.S. dan Guedes-Soares C., 2004, Effect of laminate thickness and of matrix resin on the impact of low fibre-volume, woven roving E-glass composites, *Composites Science and Technology***64**: 1691-1700.

Thwe M.M. dan Liao K., 2002, Effect of environmental aging on the mechanical properties bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites, *Composite Part A***33**: 43-52.

Ticoalu A., Aravinthan T., Cardona F., 2010, Experimental investigation into gomuti fibres/polyester composites, *Proceeding:Australasian conference on the mechanics of structures and materials*, Melburne, 7-10 December: 451-456.

Tylecote A.F., 1992, A history of metallurgy, Ed. 2, London: The Institute of Materials.

Vinson J.R. dan Sierakowski R.L., 2002, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, 2nd ed. New York: Springer.

Wambua P., Ivens I. dan Verpoest I., 2003, Natural fibers: can they replace glass and fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology***63**: 1259-1264.

- Weeton J.W., Peters D.M., dan Thomas K.L., 1990, Engineers' guide to composite materials, Metal Park: ASM International, 1.1 - 1.16.
- Widodo, B., 2008, Analisa sifat nekamik komposit epoksi dengan penguat serat pohon aren (ijuk) model lamina berorientasi sudut acak (radom), *Jurnal Teknologi Technoscientia***1(1)**:1-5.
- Wilson A.D., 1996, Fracture and fatigue properties of structural steel, dalam buku *ASM Handbook*. vol. 19: *Fatigue and Fracture*, S.R. Lampman, G.M. Davidson, F. Reidenbach, R.R. Boring, A. Hammel, S.D. Henry, W.W. Scott, N.D. Matteo, K.S. Dragolich, K. Ferjutz, H. Lampman, K. Mills, and M.J. Reiddelbanh, (Eds.), Materials Park: ASM International: 591-602.
- Yan L., dan Chow N., 2014, Sustainable Concrete and Structures with Natural Fibre Reinforcements, in *Lu, Y. (Edit.): Infrastructure Corrosion and Durability – A Sustainability Study*. Foster City: OMICS Group eBooks: 1-25.
- Yin X-W., He S-S, Zhang L-T., Fan S-W., Cheng L-F., Tian G-L. dan Li T., 2010, Fabrication and characterization of a carbon fibre reinforced carbon–siliconcarbide, titanium–silicon carbide hybrid matrix composite, *Materials Science and Engineering A***527**: 835–841.
- ZhuZ., GuoY., dan ShiN., 1998, Effect of surface modification of SiC fiber on acoustic emission behaviors and interface strength od SiC_f/Al composite, dalam buku *Progress in Acoustic Emission IX*. Kamuela: 9-14.
- Zweben C., 2006, Composite materials, dalam buku *Mechanical Engineers Handbook*, 3rd ed, M. Kutz (Ed.), Hoboken: John Wiley and Sons: 380-417.