
FISIKA MATERIAL

MATERIAL BIOKOMPOSIT

FITRIA HIDAYANTI

BUKU AJAR

**FISIKA MATERIAL:
*MATERIAL BIOKOMPOSIT***

FITRIA HIDAYANTI

LP UNAS

Fisika Material: *Material Biokomposit*

Oleh : Fitria Hidayanti

Hak Cipta© 2021 pada Penulis

Editor : Erna Kusuma Wati
dan Kiki Rezki Lestari
Penyunting : Hendra Mahendrata dan Fitri Rahmah
Desain Cover : Rudi Ristanto

ISBN: 978-623-7273-07-3

Hak Cipta dilindungi Undang-undang.
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin dari Penulis.

Penerbit : LP_UNAS
Jl.Sawo Manila, Pejaten Pasar Minggu, Jakarta Selatan
Telp. 021-78067000 (Hunting) ext.172
Faks. 021-7802718
Email : bee_bers@yahoo.com

ISBN 978-623-7273-07-3 (PDF)



KATA PENGANTAR

Dalam pembuatan buku ajar **Fisika Material: *Material Biokomposit*** ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah banyak membantu. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. El Amry Bermawi Putra, MA selaku Rektor Universitas Nasional
2. Wakil Rektor Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Nasional dan jajarannya
3. LP Unas
4. Jajaran dosen dan karyawan di lingkungan Universitas Nasional

Demikianlah semoga buku ajar **Fisika Material: *Material Biokomposit*** ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa termasuk mahasiswa Program Studi Teknik Fisika Universitas Nasional. Tentunya dalam pembuatan buku ajar ini, tidak luput dari kesalahan. Untuk itu, kami mohon masukan dari para pembaca untuk perbaikan buku ajar ini.

Jakarta, Juni 2021

Penulis

Fitria Hidayanti

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	v
Bab 1. Green Composite.....	1
1. Pendahuluan	2
2. Formulasi Komposit Hijau, Pemrosesan, Struktur, dan Properti Akhir	10
3. Pemrosesan	27
4. Aplikasi Pengemasan	34
5. Pertimbangan Dampak Lingkungan	65
6. Kesimpulan dan Perspektif Masa Depan	70
Referensi	74
Bab 2. Bangunan Sustainability	78
1. Pendahuluan	83
2. Persiapan Bahan	86
3. Standar Persiapan Spesimen Uji	89

4. Hasil Tes dan Pembahasan	92
5. Hasil Potensial dalam Struktur Bangunan Berkelanjutan	97
6. Kesimpulan	102
Referensi	106
Bab 3. Komposit Hibrida PLA.....	110
1. Pendahuluan	111
2. PLA diperkuat dengan Selulosa Nanomaterial	112
3. PLA diperkuat dengan Nanofibers dari Bakteri	143
4. Komposit PLA diperkuat dengan Kitin Nano....	152
5. PLA mengandung Bahan Nano Pati	159
6. Komposit PLA diperkuat Nanoclay	164
7. Protein yang kompatibel PLA Nanokomposit	171
8. Kesimpulan dan Perspektif Masa Depan	172
Referensi	175

Bab 4. Pengaruh Selulosa Nanokristal pada Sifat

Mekanik Komposit Material	180
1. Pendahuluan	184
2. Nanoselulosa	189
3. Sumber CNC	197
4. Komposit	203
5. Pengaruh Morfologi pada Kinerja Mekanik	223
6. Kesimpulan dan Perspektif Masa Depan	226
Referensi	229

Bab 5. 3D Printing

1. Pendahuluan	241
2. Klasifikasi Alami Serat Biokomposit	245
3. Komposit Serat Alami Berkelanjutan	250
4. Manufaktur Aditif: Komposit Serat Alami Berkelanjutan	254
5. Komponen 3D Printing dalam Aplikasi Struktural	267

6. Kesimpulan	269
Referensi	271
Bab 6. Cacat Manufaktur pada Serat Alami.....	276
1. Pendahuluan	277
2. Cacat Manufaktur	280
3. Kantong Cross – Linker yang tidak terdispersi	285
4. Misalignment dari Serat	286
5. Serat Matriks yang tidak lengkap	290
6. Kesimpulan	295
Referensi	297
Tentang Penulis	303

BAB 1 GREEN BIOCOMPOSITE

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian tentang kemasan yang ramah lingkungan telah mendapatkan momentum, terutama didorong oleh kesadaran ekologis konsumen. Biokomposit hijau memainkan peran penting dalam bahan baru dan inovatif untuk industri pengemasan berkelanjutan yang sedang berkembang, yang secara intrinsik berbasis bio dan dapat terurai secara hayati. Oleh karena itu, bab berikut ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang tren utama dalam studi dan pengembangan biokomposit hijau, dampak lingkungan dan pentingnya mereka dalam sistem produksi masa depan. Revisi matriks polimer dan pengisi yang paling banyak digunakan untuk pembuatan biokomposit hijau dan bionanokomposit telah dilakukan, dan hasil penyelidikan terbaru pada subjek dibahas.

Selain itu, peran mereka dalam kemasan aktif dan cerdas ditinjau serta penerapannya untuk teknologi pencetakan 3D.

1. Pendahuluan

Bahan komposit terdiri dari berbagai bahan, yang terdiri dari setidaknya dua senyawa yang berbeda karakteristik fisik atau kimianya berinteraksi sedemikian rupa sehingga menghasilkan bahan tunggal dengan sifat yang diharapkan lebih baik daripada komponennya secara terpisah. Umumnya, komposit terdiri dari fase lanjutan polimer (dikenal sebagai matriks) dan fase terdispersi (dikenal sebagai penguat), meskipun beberapa dibuat dengan campuran dua atau lebih polimer (Shekar dan Ramachandra). 2018). Sejumlah besar kemungkinan kombinasi senyawa dalam pengembangan material komposit telah mendorong pertumbuhan pasar material ini di berbagai bidang aplikasi, terutama industri

otomotif, kelautan, kedirgantaraan, dan konstruksi (Rodriguez et al.2012; Ramamoorthy dkk.2019). Mereka pertama kali dikembangkan sebagai alternatif berbiaya rendah untuk komponen murni dan sebagai bahan berkinerja tinggi dan berbobot rendah. Sebagian besar studi awal, serta pekerjaan saat ini, fokus pada senyawa berbasis bio dan biodegradable untuk mengembangkan di sini yang disebut biokomposit hijau yang diharapkan tidak hanya hemat biaya tetapi juga lebih ramah lingkungan. Jenis bahan ini menjadi menarik untuk digunakan dalam industri pengemasan di mana komposit konvensional menghadapi beberapa keterbatasan: pengelolaan dan daur ulang limbahnya sulit dan masih terbelakang menghasilkan limbah plastik besar yang tidak dapat terurai, sambil berkontribusi pada penipisan sumber daya petrokimia (La Mantia dan lebih nyata 2011; Shekar dan Ramachandra2018). Bahan kemasan harus cukup tahan untuk melindungi dan mengawetkan produk dari produksi melalui transportasi dan

penyimpanan sampai konsumsi, tetapi biasanya dibuang dengan sedikit atau tanpa digunakan kembali (Song et al. 2009). Oleh karena itu pengembangan biokomposit hijau, terutama yang tidak hanya berbasis hayati tetapi juga dapat terurai secara hayati, telah dipelajari secara ekstensif.

Petit dkk. (2019) menunjukkan bahwa meskipun ada penghematan moneter, ada preferensi yang kuat untuk erensi konsumen untuk paket makanan yang lebih kecil, bahkan porsi individu, di atas paket yang lebih besar karena asosiasi limbah makanan yang diantisipasi. Hal ini membuktikan, di satu sisi, bahwa konsumen memiliki peran kunci dalam membangun kecenderungan pasar, sehingga pengelolaan limbah dan pendidikan masyarakat lingkungan sangat penting untuk bergerak menuju sistem produksi yang lebih berkelanjutan. Di sisi lain, kemasan makanan yang lebih kecil dan porsinya mencegah limbah makanan, namun menghasilkan

sampah yang lebih banyak dari pengemasan, oleh karena itu perlu dikembangkan sistem pengemasan baru yang dapat meminimalkan kedua jenis limbah tersebut. Dalam hal ini, kemasan biodegradable memainkan peran sentral. Selain itu, paket hemat biaya harus menjadi pilihan termurah yang dapat menjaga produk dalam kondisi baik sampai dikonsumsi untuk menghindari kehilangan produk karena kerusakan atau kedaluwarsa. Selain itu, pengemasan harus dirancang untuk meminimalkan bahan baku dan penggunaan energi dalam produksinya dan mengurangi konsumsi energi dalam transportasi. Beberapa alternatif yang berorientasi dalam hal ini adalah, misalnya, pengurangan ketebalan pada desain botol PET atau desain profil persegi botol untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang palet. Meminimalkan penggunaan bahan baku dan kerugian produk, serta pengurangan volume dan berat transportasi tidak hanya membantu mengurangi biaya tetapi juga membuat penggunaan sumber daya berharga

lebih efisien (Emblem pengurangan ketebalan pada desain botol PET atau desain profil persegi botol untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang palet. Meminimalkan penggunaan bahan baku dan kerugian produk, serta pengurangan volume dan berat transportasi tidak hanya membantu mengurangi biaya tetapi juga membuat penggunaan sumber daya berharga lebih efisien (Emblem pengurangan ketebalan pada desain botol PET atau desain profil persegi botol untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang palet. Meminimalkan penggunaan bahan baku dan kerugian produk, serta pengurangan volume dan berat transportasi tidak hanya membantu mengurangi biaya tetapi juga membuat penggunaan sumber daya berharga lebih efisien (Emblem2012).

Saat ini, berkat kesadaran lingkungan yang lebih besar di seluruh dunia, perusahaan barang konsumen terkemuka berkomitmen pada pendekatan yang lebih holistik untuk

produksi, pengemasan, dan distribusi yang baik, sebagai gantinya dari proses yang lebih berkelanjutan untuk menghindari polusi dan penipisan sumber daya lebih lanjut. Produksi dan desain bahan kemasan yang efisien dan hemat biaya, yang melibatkan pengurangan penggunaan bahan mentah dan pengembangan bahan kemasan baru yang berbasis bio dan dapat terurai, merupakan bagian dari pandangan dunia holistik ini (Farmer2013). Akibatnya, dibandingkan dengan produk berbasis minyak bumi, produk berbasis bio yang berkelanjutan mungkin memiliki manfaat untuk semua agen yang terdiri dari: produsen dan pelanggan serta seluruh lingkungan (Georgios et al.2016).

Singkatnya, dalam mengembangkan dan merancang alternatif berkelanjutan untuk industri pengemasan, seluruh proses dari awal hingga akhir harus dipertimbangkan. Pada tahap produksi, jenis bahan baku yang digunakan, dampak lingkungannya terhadap

konsumsi sumber daya (air, bumi, energi, dll.) selama pemrosesan dan transportasi serta pencemaran yang berasal dari penggunaannya harus dipertimbangkan. Selama tahap umur simpan, efisiensinya untuk mempertahankan sifat produk kemasan tertentu untuk mencegah kehilangan produk, dengan mempertimbangkan ketahanan mekanik, permeabilitas dan, akhirnya, sifat kemasan aktif harus dipertimbangkan. Terakhir, pada tahap akhir masa pakai, kemungkinan penggunaan kembali bahan, daur ulang atau akhirnya pemulihan energi atau pengomposan (dalam kasus bahan yang dapat terurai) harus dievaluasi.

Secara umum, sifat mekanik komposit ditingkatkan dengan penambahan bahan pengisi karena kekuatan dan kekakuannya lebih tinggi daripada polimer. Revisi ekstensif dan perbandingan sifat-sifat ini telah disajikan (Georgios et al.2016 ; Castillo dkk.2017; Ramamoorthy dkk.2019). Oleh karena itu, bab ini bertujuan untuk

merevisi luas penyelidikan bahan komposit berbasis bio dan biodegradable untuk aplikasi pengemasan. Di satu sisi, jenis matriks polimer akan direvisi, terutama penggunaannya dalam sistem pengemasan aktif. Di sisi lain, berbagai jenis dan ukuran pengisi yang digunakan dan teknik pemrosesan akan dibahas. Berbagai penelitian telah mengumpulkan dan membandingkan komposit yang berbeda dan sifat komposit hijau. Jadi, meskipun berbagai sifat biokomposit akan dibahas di sini, itu pasti tidak akan lengkap karena keserbagunaan dan banyak kemungkinan formulasi bahan komposit yang terdiri dari: jenis matriks polimer; jenis, ukuran dan bentuk pengisi; jenis dan kandungan aditif (seperti plasticizer, cross-linking agent, antara lain); teknik pengolahan yang digunakan; dan kondisi pemrosesan.

2 Formulasi Komposit Hijau, Pemrosesan, Struktur, dan Properti Akhir

2.1 Menuju Komposit yang Lebih Hijau

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, komposit polimer pertama kali dikembangkan untuk mengurangi biaya dan berat. Selain itu, dengan cara ini juga ada pengurangan tersirat dalam penggunaan polimer konvensional, yang dapat berkontribusi pada penurunan penipisan cadangan minyak bumi dan semua dampak lingkungan yang berasal dari penggunaannya yang berlebihan. Selain itu, penggunaan polimer yang pada dasarnya dapat didaur ulang (terutama poliolefin), yang berarti bahwa plastik pasca-konsumen yang diperoleh dari sistem pengelolaan limbah dapat digunakan sebagian sebagai pengganti bahan baku perawan, merupakan langkah maju bahan komposit yang lebih hijau atau ramah lingkungan (La Mantia dan Morereale2011).

Langkah selanjutnya mengarah pada penggantian bahan pengisi mineral anorganik (seperti serat kaca) dengan bahan pengisi organik alami (misalnya, tepung kayu atau serat yang diekstraksi dari tanaman). Yang terakhir ini menyajikan beberapa keuntungan dari sudut pandang ekologi: mereka pada dasarnya adalah bahan yang dapat terurai secara hayati dan terbarukan; mereka biasanya berasal dari tanaman yang relatif melimpah (seringkali dari limbah) dan karena itu sangat murah; mereka juga lebih aman untuk diproses baik untuk karyawan maupun peralatan pemrosesan; mereka dapat dengan mudah dibakar; dibandingkan dengan bahan pengisi anorganik menghasilkan komposit yang lebih ringan; dan memungkinkan memperoleh bahan komposit dengan isolasi termal dan akustik (Joshi et al.2004; Dittenber dan Ganga Rao2012; Sapuan dkk.2016; Castillo dkk.2017). Meskipun komposit hijau yang mengandung pengisi alami baru yang berkelanjutan telah menarik beberapa penelitian untuk aplikasi industri yang berbeda sebagai

cara untuk mencapai penggunaan sumber daya yang lebih efisien, beberapa keterbatasan mengenai keuletan komposit, kemampuan proses, dan stabilitas dimensi telah muncul (La Mantia dan Morereale 2011; Nayak dan Khuntia2019). Masalah-masalah ini sebagian besar berasal dari sifat hidrofilik bioreinforcements dan stabilitas termal yang rendah. Banyak modifikasi kimia dan fisik dari bahan pengisi organik dapat dilakukan untuk meningkatkan baik sifat serat maupun interaksi serat-polimer, dan akibatnya kinerja akhir komposit (Azwa et al.2013; Shalwan dan Yousif2013; Castillo dkk.2017). Meskipun demikian, pendekatan berkelanjutan yang terintegrasi dengan dampak lingkungan yang nyata hanya dapat diperoleh dengan mengganti polimer berbasis minyak konvensional dengan yang berbasis bio dan biodegradable. Namun, ini menghadirkan batasan baru mengenai kinerja mekanis yang lebih rendah dan stabilitas dimensi. Dengan demikian, bahan-bahan ini harus dipelajari dan

dikembangkan untuk aplikasi tertentu di mana ketahanan mekanik dan daya tahan yang sangat tinggi bukanlah sifat yang relevan, yang merupakan kasus penggunaan kemasan yang paling. Penelitian tentang biokomposit hijau saat ini difokuskan pada pemilihan matriks biodegradable yang paling cocok untuk setiap jenis produk dan optimalisasi formulasi dan kondisi pemrosesan. Banyak dari penyelidikan ini mengeksplorasi pengisi alami berkelanjutan baru sebagai agen bioreinforcement.

Mengenai situasi pasar biomaterial, dapat dikatakan bahwa meskipun bioplastik memiliki pertumbuhan yang kuat di pasar dunia dalam satu dekade terakhir, ini masih dalam tahap pembukaan. Menurut laporan perusahaan Allied Analytics LLP, pada tahun 2014 terdapat 4869 ribu ton bioplastik yang dikomersialkan dan diperkirakan untuk periode 2018–2024 tingkat pertumbuhan tahunan sebesar 20,45% (Allied Analytics LLP2018). Pertumbuhan

ini tidak hanya disebabkan oleh berbagai potensi aplikasi bahan-bahan ini tetapi juga karena kebijakan pemerintah yang menguntungkan yang bertujuan untuk meningkatkan produksi dan konsumsi produk yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Namun, upaya penelitian yang signifikan diperlukan untuk mengembangkan biokomposit hijau dengan kinerja yang serupa dengan rekan-rekan mereka yang berbasis minyak bumi dan juga biaya yang kompetitif.

2.2 Matriks Polimer

Sebelum menganalisis dan membandingkan matriks polimer yang berbeda yang digunakan dalam biokomposit hijau, klasifikasi polimer yang tepat harus dinyatakan. Biasanya, itu akan dianggap sebagai biokomposit hijau seperti komposit yang harus terdiri dari abioplastik sebagai fase polimer. Istilah ini mencakup semua plastik yang dapat terurai secara hayati

atau berbasis bio atau keduanya (Gbr.1), maka ada polimer berbasis bio yang tidak dapat terurai secara hayati (yaitu poliolefin hijau) atau bahan yang dapat terurai secara hayati yang berbasis minyak bumi (yaitu polikaprolakton). Namun, sejauh bab ini akan dipertimbangkan untuk konstituen komposit hijau yang harus dapat terurai secara hayati.

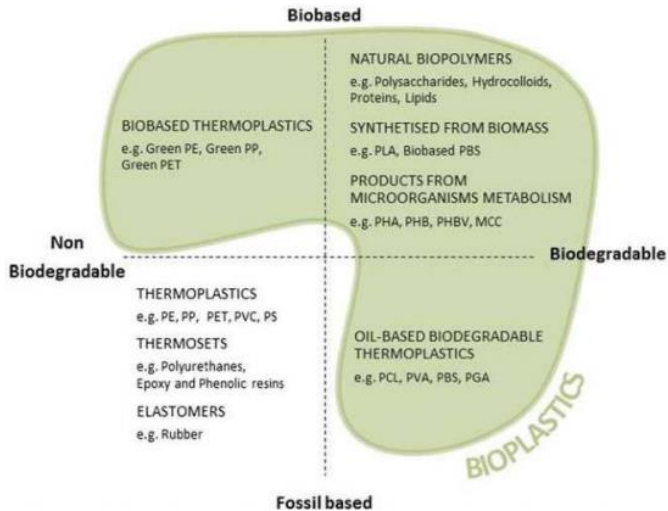
Adapun matriks polimer non-biodegradable yang digunakan dalam bidang komposit hijau (yang bisa berbasis atau tidak), ini terutama poliolefin (serta beberapa poliuretan atau resin fenolik) dalam kombinasi dengan bahan pengisi alami: sebagian besar serat lignoselulosa (Netravali dan Chabba 2003; Iyer dkk.2015; Dey dan Ray2018; Dixit dan Yadav2019; Hidalgo-Salazar dan Salinas2019) atau pengisi mineral (Hatakeyema et al. 2005; Cazan dkk.2019; Hanken dkk.2019). Opsi yang lebih hijau dalam hal ini adalah penggunaan mitra berbasis bio.

Adapun bioplastik biodegradable dari fosil, sebagian besar karya komposit dilaporkan menggunakan polikaprolakton (PCL) atau polivinil alkohol (PVA) sebagai matriks polimer dan dalam beberapa kasus dikombinasikan dengan polimer biodegradable lainnya, seperti pati dan kitosan (Liu et al. 2010; Ludueña dkk.2012; Tanase dkk.2015; Xiong dkk.2018; Ahmad dkk. 2019; Huang dkk.2019; Wang dkk.2019; Wu dkk. 2019). Meskipun matriks polimer ini biasanya memiliki sifat mekanik dan ketahanan air yang lebih baik daripada polimer alami dan, berkat biokompatibilitasnya, lebih cocok untuk aplikasi biomedis, mereka memiliki biaya yang jauh lebih tinggi (Chen et al.2013; Trakoolwannachai dkk.2019; Zhang dkk.2019).

Polimer alami dan bioplastik biodegradable yang disintesis dari biomassa (yaitu asam polilaktat (PLA) atau polihidroksialkanoat (PHA)) adalah matriks polimer yang paling diinginkan dari sudut pandang lingkungan, karena

praktik budidaya berkelanjutan dengan penggunaan air yang terkontrol dan aplikasi agrokimia yang minimal atau tidak sama sekali. . Dibandingkan dengan plastik konvensional, bioplastik ini memiliki berbagai keunggulan: biaya rendah (dalam kasus biopolimer alami), ketersediaan besar, dan biodegradabilitas (Ramamoorthy et al. 2019). Sumber daya terbarukan yang paling banyak diterapkan termasuk minyak tumbuhan, polisakarida (terutama selulosa dan pati), dan protein; sebagian besar digunakan sebagai prekursor untuk resin sintesis (Georgios et al.2016). Keterbatasan utama untuk penerapan biopolimer ini adalah karena ketahanan termal, air, dan mekaniknya yang lebih rendah. Misalnya, PLA sensitif terhadap degradasi hidrolitik di bawah kondisi pemrosesan lelehan dengan adanya sejumlah kecil uap air (Mukherjee dan Kao 2011); dan pati hanya dapat diproses secara termo dengan adanya pemlastis karena film yang tidak diplastisasi sangat rapuh (López et al.2008; Versino dkk.2019). Selain

itu, biaya produksi bioplastik saat ini tidak kompetitif dengan polimer tradisional komoditas, bukan karena biaya bahan baku melainkan produksi volume rendah (Georgios et al.2016). Tinjauan literatur menunjukkan sejumlah besar studi tentang polimer biodegradable dan biobased, menjadi kunci untuk mengembangkan kemasan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan; PLA, (Mukherjee dan Kao2011; Arrieta dkk.2014; Fortunati dkk.2015; Yusoff dkk.



Gambar 1 Klasifikasi polimer menurut biodegradabilitas dan sumbernya. *Catatan*: PE: polietilen; PP: polipropilen; PET: polietilen tereftalat; PVC: polivinil klorida PS: polistirena; PLA: asam polilaktat; PBS: poli butilena suksinat; PHA: polihidroksialkanoat; PHB: polihidroksibutirat; PHBV: Poli(3-hidroksibutirat-co-3-hidroksivalerat); PKS: selulosa mikrokristalin; PCL: polikaprolakton; PVA: polivinil alkohol; PGA: asam poliglukolat

2.3 Pengisi Alami

Pengisi alami dapat berupa organik dan anorganik. Dalam hal ini, silikat berlapis (tanah liat), karbon nanotube, dan nanopartikel mineral (talca), antara lain, adalah pengisi anorganik yang paling banyak digunakan dalam bahan komposit (Castillo et al.2017). Ini biasanya

pengisi berukuran nano (artinya bahwa setidaknya satu dari dimensi mereka lebih kecil dari 100 nm) yang telah terbukti menyebabkan perubahan penting dalam sifat komposit bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah (Castillo et al.2015). Meskipun pengisi ini tidak dapat terurai secara hayati atau terbarukan, mereka biasanya pengisi alami dan diharapkan secara umum tidak berbahaya bagi lingkungan ketika biokomposit dikomposkan. Meskipun demikian, toksisitasnya masih dalam penelitian (Yu et al.2019).

Serat organik, di sisi lain, biasanya bahan lignoselulosa yang berasal dari jaringan tanaman, sehingga sepenuhnya biodegradable dan terbarukan setiap tahun. Mereka terbuat dari tiga komponen utama: selulosa, lignin, dan hemiselulosa. Selulosa adalah senyawa serat yang paling melimpah yang bertanggung jawab atas kekuatan dan stabilitas yang melekat, sementara hemiselulosa berkontribusi untuk mempertahankan

struktur serat, dan lignin melindungi matriks dari serangan patogen (Taiz dan Zeiger2002). Serat tumbuhan alami adalah alternatif yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan daripada serat sintetis: mereka adalah bahan organik terbarukan dengan persyaratan proses energi yang rendah, dan karenanya netral karbon dioksida jika dikomposkan (John dan Thomas2008). Selain itu, mereka dapat diperoleh dari limbah pertanian atau kayu, berkontribusi pada produksi bahan yang lebih berkelanjutan (Versino et al.2019). Selain itu, mereka kurang abrasif untuk peralatan pemrosesan, pada dasarnya lebih murah, dan memiliki kepadatan yang lebih rendah (Sapuan et al. 2016). Mohanty dkk. (2000), Väisänen dkk. (Väisänen et al.2016), dan Djafari Petroudy (2017) telah secara ekstensif meninjau komposisi dan sifat mekanik dari serat alam yang paling banyak digunakan dalam industri. Kepadatan serat organik alami di sana dilaporkan bervariasi dari 0,7 hingga 1,5 gm/cm³, secara signifikan lebih rendah dari serat kaca (2,5 gm/

cm³). Secara umum, efisiensi penguatan serat tanaman bergantung pada sifat selulosa dan kristalinitas, dan keselarasannya di dinding sel: kandungan selulosa tinggi dan sudut mikrofibril rendah (MFA, didefinisikan sebagai sudut yang dibuat serat mikro terhadap sumbu serat) diinginkan (Georgios dkk. 2016; Djafari Petroudy 2017). Secara komparatif, serat rami, rami dan rami menunjukkan kandungan selulosa yang lebih tinggi dan MFA yang lebih rendah dan, dengan demikian, kekuatan tarik tertinggi dan modulus Young, menunjukkan ketahanan mekanik yang unggul.

Biofiber memiliki stabilitas termal rendah yang membatasi kondisi pemrosesan dan daur ulang komposit yang mengandungnya. Jika mereka terkena suhu pemrosesan yang tinggi (biasanya sekitar 200 °C) untuk waktu tertentu, sifat mekaniknya dapat terdegradasi secara signifikan. Misalnya, telah ditinjau penurunan 10% pada kekuatan tarik serat rami telanjang dengan

paparan 10 menit pada 200 °C, sementara efek ini dihambat dalam komposit serat PP/sisal yang menandakan bahwa serat dilindungi oleh matriks polimer (Ramamoorthy et al. 2019). Selain itu, Chaitanya et al. (2019) membuktikan bahwa ada penurunan yang nyata dari stabilitas termal biokomposit serat PLA/sisal dengan siklus daur ulang.

Kerugian utama lain dari bahan pengisi organik alami adalah hidrofilitas dan kadar airnya. Ini mempengaruhi sifat mekanik dan stabilitas dimensi dan komposit yang mengandung mereka, serta adhesi antarmuka antara pengisi dan polimer (umumnya hidrofobik) yang memiliki dampak penting pada dispersi mereka dalam matriks (La Mantia dan Morereale).2011). Oleh karena itu, penelitian difokuskan pada modifikasi permukaan bahan pengisi alami untuk meningkatkan interaksi bahan pengisi polimer dan sifat serat. Bahkan ketika kedua komponen pada dasarnya hidrofilik, penambahan

pengisi yang tidak diolah dapat menyebabkan sifat mekanik yang buruk dibandingkan dengan polimer yang rapi jika terjadi aglomerasi partikel pengisi. Dalam hal ini, baik modifikasi kimia dan fisika dari serat alam telah dipelajari dan dilaporkan secara luas (Kalia et al.2009; Kabir dkk.2012). Perlakuan yang paling banyak digunakan adalah merserisasi (perlakuan alkali) dengan larutan NaOH encer, suatu perlakuan dasar dalam industri kertas yang menghilangkan sebagian lignin, lilin dan minyak dari serat. Perlakuan ini mendistorsi struktur selulosa kristal yang dikemas, menghasilkan permukaan serat yang lebih kasar dan struktur yang lebih berpori yang meningkatkan pembasahan. Modifikasi alkali biasanya diikuti dengan asetilasi serat yang membantu menstabilkan dinding sel dan meningkatkan ketahanan air (meningkatkan hidrofobisitas). La Mantia dan Morereale (2011) telah menjelaskan dengan jelas modifikasi kimia yang digunakan pada bahan pengisi alami, menyatakan bahwa perlakuan dengan TDI (reaksi

dengan toluena-2,4-diisosiyanat), dikumulperoksida, dan silan tampaknya paling efektif dalam perbaikan sifat mekanik, sedangkan merserisasi dan asetilasi meningkatkan stabilitas termal dan dimensi. Perawatan ozon dan plasma juga telah dilaporkan, menunjukkan keterbasahan dan kekasaran yang lebih besar dari serat yang diolah, yang meningkatkan interaksi polimer-pengisi dan oleh karena itu meningkatkan sifat mekanik komposit yang diperoleh dengan matriks polimer yang berbeda, baik bio maupun konvensional (De Oliveira et Al.2017; Ventura dkk.2017; Fazeli dkk.2019; Putra dkk.2020; Sánchez dkk.2020).

Namun, berbagai faktor harus dinilai ketika memilih perawatan pengisi untuk komposit hijau: biaya (terutama dalam hal teknik rumit yang dapat membuat beberapa metode tidak praktis untuk aplikasi industri), konsumsi energi, jenis dan jumlah limbah yang dihasilkan, toksisitas reagen dalam jangka panjang. eksposur (untuk

kondisi kerja yang aman), dan dampak lingkungan global dari proses. Dalam hal ini, perawatan plasma sangat diminati karena memiliki energi yang rendah dan penggunaan reagen kimia, tidak memerlukan air dan dapat dimasukkan ke dalam proses yang berkelanjutan (Ventura et al.2017).

Alternatif lain untuk menghasilkan komposit hijau dengan peningkatan adhesi antar muka komponen dan dispersi pengisi adalah penambahan sejumlah kecil komponen ketiga yang bertindak sebagai kompatibilizer antara pengisi dan matriks polimer dengan membentuk ikatan kimia (baik kovalen atau jenis Van der Waals) dengan keduanya. bagian (LaMantia danMoreale 2011). Lisin-diisositrat dan lignin teresterifikasi, misalnya, telah digunakan sebagai bahan penghubung dalam berbagai biokomposit hijau yang dilaporkan dalam literatur (Lee dan Wang2006; Anugwom dkk.2019). penggunaan dari non-toksik dan lebih disukai kompatibilizer berbasis bio

harus dipelajari secara istimewa untuk pengembangan biokomposit hijau berkelanjutan baru.

Namun salah satu masalah utama dalam penggunaan bahan pengisi alami-organik adalah variasi sifat dari sumber botani, musim panen, dan daerah dengan radiasi matahari yang berbeda, curah hujan, komposisi tanah, dan suhu hari minimum/maksimum. Upaya untuk mengatasi masalah ini adalah dengan mencampurkan kumpulan serat panen yang berbeda dari jenis yang sama atau jenis serat yang berbeda (Georgios et al.2016).

3 Pemrosesan

Biokomposit diproduksi menggunakan berbagai teknik konvensional untuk pemrosesan plastik, biasanya ekstrusi dan kemudian pencetakan kompresi dan injeksi. Untuk setiap formulasi komposit, parameter pemrosesan seperti suhu, tekanan, dan waktu perlu dipelajari untuk

mengoptimalkan sifat akhir bahan. Demikian juga, tidak hanya sifat intrinsik filler dan resin tetapi juga karakteristik antarmuka filler-polimer sangat penting untuk sifat akhir komposit (Shekar dan Ramachandra 2018). Keterbatasan utama dalam pemrosesan biokomposit hijau adalah karena sifat higroskopis dari pengisi dan ketahanan termal yang buruk (LaMantia dan Moreale 2011). Adanya uap air, serta penggunaan air sebagai plasticizer (terutama dalam hal bahan berbasis pati), umumnya mengarah pada pembentukan uap air selama pemrosesan yang dapat mengganggu adhesi pengisi polimer, menghasilkan cacat struktural (yaitu rongga) di produk akhir selama pencetakan jika sistem ventilasi tidak disediakan. Akibatnya, pengisi alami biasanya dikeringkan sampai batas tertentu (sekitar 2-3%) untuk menghindari aglomerasi serat selama pemrosesan tanpa mengurangi kinerja mekanisnya (Singh et al.2017).

Teknik pengolahan serta formulasi komposit telah terbukti berdampak pada sifat akhir biokomposit. Sebuah karya yang menarik oleh Morereale et al. (2008) pada komposit berbasis MaterBi® dengan tepung kayu, menunjukkan bahwa kandungan filler adalah variabel proses yang memiliki dampak lebih besar pada kekakuan material, sedangkan kekuatan impact secara signifikan dimodifikasi oleh kecepatan pencampuran dan rasio aspek filler. Ashori dan Nourbakhsh (2010) juga menyimpulkan bahwa aspek rasio memiliki pengaruh yang lebih besar pada sifat mekanik dari komposit PP dengan serat oak dan pinus daripada ukuran partikel. Banyak penulis lain telah menunjukkan bagaimana parameter pemrosesan yang relatif berbeda memiliki dampak yang lebih besar secara statistik terhadap sifat biokomposit (Dauda et al.2007; Castillo dkk.2013; Muthuraj dkk.2016).

Karena stabilitas termal yang relatif rendah dari pengisi alami-organik, kondisi suhu pemrosesan komposit hijau terbatas, menjadi 140-190 °C kisaran suhu pemrosesan khas yang dilaporkan untuk ekstrusi, pencampuran campuran dan pencetakan termo dari matriks polimer yang berbeda (Morreale dkk. 2008; López dkk. 2015; Jumaidin dkk.2016; Mendes dkk.2016; Scaffaro dkk.2018; Versino dkk.2019). Sistem induksi elektromagnetik untuk komposit PLA/kain goni diusulkan oleh Tanaka et al. (2008) memungkinkan pemanasan instan permukaan cetakan, sehingga mengurangi waktu siklus produksi, dan akibatnya, biaya proses dan kemungkinan degradasi termal dari komponen komposit. Metode pengecoran material komposit umumnya dilakukan pada suhu rendah dan digunakan secara luas di laboratorium atau studi skala produksi kecil, namun karena penggunaan pelarutnya yang tinggi, sulit untuk meningkatkan skala ke proporsi industri. Namun, studi matriks pengisi dalam sistem pengecoran

sederhana dan sangat berguna untuk memahami interaksi komponen komposit.

Selain itu, karena masuknya serat cenderung meningkatkan viskositas adonan polimer cair, gaya geser yang lebih tinggi diperlukan untuk membuat campuran polimer pengisi mengalir. Oleh karena itu, studi reologi formulasi biokomposit sangat penting dalam hal kondisi pemrosesan yang diperlukan serta potensi peningkatannya. Selain itu, respon reologi berkaitan erat dengan dispersi dan orientasi bahan pengisi, serta interaksinya dengan matriks polimer (Wang et al.2018; Borchani dkk.2019). Secara umum, studi rotasi reologi menunjukkan peningkatan viskositas biokomposit hijau di bawah kondisi aliran, menunjukkan hambatan keseluruhan dari kemampuan prosesnya (Scaffaro et al.2018; Wang dkk.2018; Xiao dkk. 2019). Tren serupa diamati pada biokomposit TPS jagung selama proses pencampuran leleh, di mana peningkatan torsi

maksimum pencampuran yang dikaitkan dengan viskositas material selama pemrosesan dan karenanya ketahanan leleh terhadap aliran (Vallejos et al. 2011; Versino dkk.2019). Namun, efek sebaliknya diamati ketika bekerja pada biokomposit TPS singkong dengan produk sampingan akar singkong, yang dikaitkan dengan kesukaan termodinamika dari proses difusi plasticizer menjadi butiran pati singkong dengan penambahan bahan pengisi (Versino et al.2015), mungkin karena kandungan amilopektin dan perbedaan panjang rantai antara pati asal botani. Selain itu, Scaffaro et al. (2018) dan Xiao dkk. (2019) mengamati efek penipisan yang lebih jelas (penurunan viskositas nyata pada frekuensi osilasi yang lebih tinggi) pada biokomposit dengan beban pengisi yang lebih tinggi (>20%) yang menunjukkan interaksi yang lebih besar antara partikel, yang terganggu pada frekuensi yang lebih tinggi oleh pelepasan dan reorientasi pengisi dan polimer rantai dalam arah aliran. Studi lain yang menarik dilakukan oleh Borchani et al.

(2019) menunjukkan dampak perlakuan serat alkali yang berbeda pada biokomposit berbasis Mater-Bi® pada perilaku reologi campuran cair, menunjukkan kekuatan jaringan gel yang lebih besar dari biokomposit serat yang dirawat karena interaksi yang lebih besar antara matriks dan pengisi yang diolah.

Perilaku reologi di bawah kondisi aliran lelehan menghasilkan parameter desain yang penting juga untuk biokomposit untuk aplikasi pencetakan 3D, sebuah alternatif yang saat ini juga sedang dipelajari secara luas. Pengembangan filamen pencetakan 3D biokomposit hijau dapat menghasilkan minat yang besar untuk industri pengemasan, memungkinkan untuk meningkatkan ketahanan mekanis paket dibandingkan dengan filamen polimer rapi, serta kemungkinan merancang paket berfitur khusus untuk meminimalkan kerusakan produk dan volume paket. Le Duigou dkk. (2019) mengembangkan filamen serat PLA/flax dengan

sifat mekanik yang lebih baik daripada banyak biokomposit serat alami lainnya.

4 Aplikasi Pengemasan

Bahan komposit hijau telah dipelajari dan digunakan dalam banyak aplikasi industri seperti konstruksi (kusen jendela, pintu, panel isolasi), furnitur, bantalan rel kereta api, suku cadang otomotif, barang berkebun, pengemasan, dan berbagai aplikasi lain dengan biaya rendah dan persyaratan kinerja mekanis tidak tinggi (La Mantia dan Morereale 2011; Gurunathan dkk. 2015; Dey dan Ray 2018). Kemungkinan tren yang lebih ramah lingkungan dan nyaman yang sedang dipelajari adalah penggunaan polimer daur ulang sebagai pengganti polimer murni untuk mengurangi biaya produksi dan mengembangkan bahan yang lebih berkelanjutan. Banyak sepatu dan pakaian merek internasional telah bergerak ke arah yang lebih ramah lingkungan ini, namun

bahan biokomposit tidak banyak digunakan. Dalam hal ini, aplikasi pengemasan adalah skenario yang paling menjanjikan untuk penggunaan dan pengembangan biokomposit hijau, karena mewakili 30–35% dari limbah padat perkotaan yang dihasilkan setiap tahun (Tencati et al.2016), memiliki persyaratan ketahanan mekanis yang ringan, dan biasanya dibuang setelah sekali pakai, terutama untuk kemasan makanan di mana daur ulangnya lebih rumit dan memakan air. Komposit biodegradable adalah salah satu alternatif berkelanjutan yang paling menjanjikan untuk aplikasi pengemasan. Areview olehTang et al. (2012) merangkum penghalang dan sifat mekanik dari film biopolimer dan komposit biobased yang paling sering dipelajari untuk aplikasi pengemasan makanan, menyatakan bahwa sifat penghalang uap air dan mekanik yang buruk mewakili keterbatasan terbesar dari bahan-bahan ini. Namun, bahan baru dan yang disempurnakan telah dikembangkan hingga saat ini, dengan fokus kuat pada

kemasan aktif dan cerdas. Yang pertama memiliki fungsi spesifik yang berbeda dari karakteristik pelindung biasa dari kemasan yang dihasilkan dari adanya atau pelepasan terkontrol dari senyawa aktif (yaitu aktivitas antimikroba, pembersihan gas, dll.), sedangkan yang kedua memberikan informasi kepada konsumen mengenai kondisi produk berdasarkan beberapa parameter kualitas terukur yang dirasakan oleh bahan kemasan (yaitu pH, batas suhu, dll.).

Selanjutnya, penggunaan pencetakan 3D dari biokomposit hijau juga menarik minat industri pengemasan. Dengan teknologi ini, struktur yang disesuaikan dapat dirancang dengan sifat struktural yang dioptimalkan untuk meminimalkan penggunaan bahan perawan dengan mengurangi ketebalan yang dibutuhkan untuk mencapai sifat mekanik yang sama dan pemborosan akibat pemotongan. Selain itu, biokomposit hijau yang dapat dicetak 3D adalah kandidat yang

inovatif dan menjanjikan untuk bahan yang dapat terurai secara hayati dan fleksibel serta untuk pengembangan sensor untuk aplikasi pengemasan cerdas. Misalnya, Dai et al. (2019) menyatakan bahwa menurut sifat reologi dan mekaniknya, material komposit dengan serat nano selulosa (CNF) merupakan alternatif yang menjanjikan untuk pencetakan 3D.

Di sisi lain, biokomposit hijau akhir-akhir ini dipelajari sebagai bahan yang diperluas atau seperti busa yang digunakan sebagai kemasan lepas dan nampan makanan sekali pakai yang biasanya digunakan dalam pengiriman makanan di masyarakat urban modern kita. Polystyrene (PS) umumnya digunakan untuk aplikasi ini, namun merupakan polimer berbasis minyak bumi dan non-biodegradable yang agak sulit untuk dikumpulkan dan didaur ulang dalam sistem pengelolaan limbah, oleh karena itu alternatif biodegradable dan biobased baru sedang diselidiki (Soykeabkaew et al.2015). Davis dan

Song (2006) setelah menganalisis dampak kemasan biodegradable pada sistem pengelolaan limbah dibandingkan dengan bahan pengemas polimer berbasis minyak, yang pertama dapat memiliki efek lingkungan yang positif jika pengomposan di tempat menyediakan pengumpulan, pengangkutan, dan pengolahan khusus limbah yang dapat dikomposkan dengan tepat.

Beragam biokomposit dan bionanokomposit telah dikembangkan dan dipelajari sebagai alternatif berkelanjutan untuk bahan kemasan karena masalah lingkungan yang mendesak yang berasal dari penggunaan ekstensif polimer berbasis minyak yang tidak berkelanjutan. Bahan-bahan ini memerlukan sifat yang berbeda tergantung pada produk yang harus dilindungi dalam kemasan (yaitu produk makanan, farmasi atau elektronik), meskipun sifat penghalang mekanik dan gas yang baik adalah karakteristik yang paling diinginkan.

4.1 Biokomposit Hijau Termoplastik

Biokomposit hijau termoplastik menghadirkan berbagai sifat dan karakteristik yang sesuai untuk aplikasi pengemasan, mulai dari kantong ekstrusi tiup hingga nampan dan wadah thermoformed.

Sebagian besar bahan biodegradable memiliki sifat mekanik atau penghalang yang buruk, sehingga bahan komposit yang menggabungkan lebih dari satu jenis bioplastik telah dipelajari karena sifat akhirnya yang ditingkatkan. Salah satu bioplastik yang paling banyak digunakan saat ini adalah PLA karena tidak beracun, biodegradable, biokompatibel, dan memiliki sifat mekanik dan termal yang sebanding dengan plastik konvensional seperti PS dan PET. Namun demikian, PLA memiliki beberapa keterbatasan yang ada: seperti kerapuhan yang melekat, resistensi dampak rendah, perilaku kristalisasi yang buruk, ketangguhan yang buruk,

dll (Ghosh et al.2019). Untuk menyesuaikan sifat bahan dan mengurangi biaya produksi, campuran PLA dengan bioplastik dan biokomposit lain telah dipelajari secara luas (Madhavan Nampoothiri et al.2010). Burzic dkk. (2019) menemukan bahwa PLA/PHA (80/20) memadukan kristalisasi PLA dan kekuatan impact yang ditingkatkan secara signifikan tanpa terdiri dari asal-usul biobased dan karakter biodegradable dari bahan-bahan tersebut. Film biokomposit PLA dengan ekstrusi tiup dengan kitosan fungsional dan gom arab dikembangkan oleh Ghosh et al. (2019), menunjukkan ketahanan sobek yang lebih baik dan sifat termomekanis dan mungkin juga merangsang biodegradasi enzimatik dari komposit. Campuran dengan pati juga telah dipelajari secara luas sebagai sarana pengurangan biaya bahan dan pengurangan dampak lingkungan, karena pati merupakan biopolimer yang melimpah, terbarukan, biodegradable, dan murah. Bahkan dampak lingkungan yang lebih rendah dapat dicapai dengan menggunakan

pati yang berasal dari air limbah ekstraksi pati seperti yang dilaporkan oleh Broeren et al. (2017). Karena sifat higroskopis pati dan sifat hidrofobik PLA, adhesi lemah diperoleh dalam campuran PLA/pati sederhana, yang diperlukan strategi kopling yang tepat (Müller et al.2016). Beberapa studi penelitian mengevaluasi proses pencangkakan dan penggunaan kompatibilizer dengan hasil yang menjanjikan (Lee dan Wang2006; Shirai dkk.2013; Yang dkk. 2013; Akrami dkk.2016; Ibrahim dan Ab Wahabi2017). De Oliveira dkk. (2019) membandingkan dampak siklus hidup dari PLA termoplastik yang rapi dan biokomposit PLA/ pati/serat kapas, yang terakhir terbukti memiliki kinerja keseluruhan yang lebih baik dalam hal eko-efisiensi meskipun langkah akhir masa pakai bahan tidak dipertimbangkan.

Selain itu, biokomposit PLA lainnya dengan pengisi alami yang diperoleh dari bahan limbah yang berbeda, seperti

ganggang yang dikumpulkan dari pantai, serbuk gergaji pohon atau limbah agroindustri, telah menunjukkan peningkatan yang nyata dalam sifat mekanik film dan sifat optik yang baik (Fortunati et al. 2015; Agustin-Salazar dkk.2018; Scaffaro dkk. 2018; Orue dkk.2019; Silva dkk.2019). Umumnya, perlakuan permukaan (yaitu perlakuan alkali) dari bahan pengisi organik alami diperlukan untuk meningkatkan daya rekat antara matriks PLA dan partikel pengisi. Demikian juga, penelitian terbaru pada komposit PLA dengan pengisi anorganik alami menunjukkan bahwa perlakuan permukaan secara drastis mempengaruhi perilaku mekanik biokomposit, mengamati peningkatan yang signifikan dalam ketangguhan bahan ketika partikel kalsium karbonat diperlakukan dengan asam stearat digunakan dengan adanya 20% berat. dari plasticizer (Aliotta et al.2019). Para penulis menyimpulkan bahwa perawatan permukaan sangat penting untuk dispersi partikel pengisi yang lebih baik dalam matriks, sehingga

ketika direndam dalam matriks polimer plastis (lebih ulet dan dengan mobilitas rantai yang lebih tinggi) pengisi yang tersebar menghilangkan energi dengan pembentukan rongga, deboning dan ligamen matriks. menghasilkan. Hasil yang menarik ditemukan oleh Singh et al. (2019) dalam biokomposit PLA yang diperkuat dengan tabung nano halloysite dan bubuk kitosan: efek sinergis dari kedua pengisi secara efisien meningkatkan keuletan bahan tanpa mengurangi ketahanan tarik bahkan tanpa adanya plasticizer.

Pati itu sendiri merupakan bahan baku yang murah, dapat terurai sepenuhnya dan bahan baku dengan dampak lingkungan yang rendah untuk biokomposit hijau. Campuran pati dengan kitosan, gelatin atau protein kedelai juga telah dilaporkan untuk aplikasi kemasan makanan (Versino et al.2016). Beberapa campuran berbasis pati saat ini tersedia secara komersial dengan merek dagang seperti Mater-Bi® (Novamont,

Italia), Bioplast® (Biotech, Jerman), Novon™ (Chisso, Jepang dan Warner-Lambert, AS), Biopar® (Biop Biopolymer Technologies AG, Jerman), Gaialene® (Roquette, Prancis) dan Solanyl® (Rodenburg Biopolymers, Belanda) (Gurunathan et al. 2015). Selain itu, bahan komposit berbasis pati baik dengan pengisi organik dan anorganik alami telah dipelajari secara ekstensif dan ditinjau oleh Castillo et al. (2017). Pada penelitian sebelumnya, ampas tebu dan kulit dari ekstraksi pati umbi akar digunakan sebagai pengisi biokomposit berbasis TPS jagung dan singkong. Peningkatan ketahanan mekanik bahan yang diperkuat hingga konten pengisi 1,5% diamati pada film yang diperoleh dengan thermomoulding, meskipun ketahanan air dan permeabilitas tidak ditingkatkan (Versino et al. 2015, 2019; López dkk.2015). Hasil serupa diperoleh oleh Merci et al. (2019) untuk komposit berbasis pati singkong dengan kulit kedelai atau selulosa mikrokrystalin, menunjukkan permeabilitas uap air yang

lebih rendah pada komposit dengan 2,5% pengisi. Permeabilitas uap air dan kelarutan film komposit PLA/pati juga ditingkatkan dengan menambahkan lapisan ikatan silang kitosan di atas campuran komposit (Soares et al.2013). Li dkk. (2018) mengembangkan biokomposit pati/nanoselulosa dengan dispersi serat yang baik hingga kandungan serat 15% dan meningkatkan ketahanan mekanik dan hidrofobisitas (peningkatan sudut kontak). Banyak biokomposit berbasis nanoselulosa telah dikembangkan dan menyajikan hasil yang luar biasa dalam hal sifat optik, penghalang, dan mekanik; namun produksinya sangat memakan energi yang mengurangi karakter ramah lingkungan yang diperlukan perkembangan teknologi dalam hal ini (Shanmugam et al.2019). Akibatnya, bahan berbasis nanoselulosa sedang dipelajari dan dikembangkan untuk aplikasi bernilai tinggi, terutama sebagai bahan berkelanjutan dan inovatif berbasis bio

untuk elektronik fleksibel, perangkat penyimpanan energi, dan membran pengolahan air (Fang et al. 2019).

Pati serta biopolimer lain seperti kitosan, karboksimetil selulosa, dan gelatin memiliki kinerja mekanik yang buruk dan ketahanan air yang rendah, sehingga biokomposit dan bionanokomposit saat ini sedang dipelajari sebagai cara inovatif untuk memproduksi bahan kemasan berkelanjutan baru yang inovatif (Youssef dan El-Sayed 2018). Pengembangan yang terakhir adalah minat khusus dalam kemasan aktif atau cerdas (ini akan dibahas lebih lanjut dalam bab ini), tetapi studi dan penggunaannya telah meningkatkan perhatian sehubungan dengan difusi nanopartikel dan potensi toksisitas.

4.2 Biokomposit Busa Hijau

Jenis bahan lain yang dapat dihasilkan dari biokomposit hijau adalah bahan seperti busa, yang telah menjadi perhatian utama sebagai alternatif ramah lingkungan untuk kemasan polystyrene (PS) bekas. Polimer sintetik non-biodegradable ini banyak digunakan dalam wadah makanan sekali pakai dan kemasan untuk produk yang rentan terhadap kerusakan mekanis. Namun sulit untuk mengumpulkan dalam kondisi yang memadai untuk daur ulang. Selain itu, penilaian siklus hidup untuk peralatan gandum yang dilakukan oleh Razza et al. (2015) menunjukkan bahwa bahan kemasan prototipe berbasis pati yang diperoleh dengan teknologi gelombang mikro, menyiratkan pengurangan konsumsi sumber daya energi tak terbarukan (50%) dan emisi gas rumah kaca (60%) dibandingkan dengan rekan PS yang diperluas. Dalam hal ini, menurut Guan dan Hanna (2004), busa pati merupakan alternatif yang menjanjikan untuk PS, terutama untuk aplikasi kemasan lepas-isi. Bahan-bahan ini harus ringan, kompresibel, dan cukup tahan untuk

melindungi dan menstabilkan barang yang dikemas. Selanjutnya, pati dapat dengan mudah diproses dengan memasak ekstrusi (metode yang biasa digunakan dalam industri makanan) menjadi busa yang dapat diisi lepas (Mitrus dan Moscicki).2014). Busa berbasis pati juga dapat dicetak menjadi baki, aplikasi pengemasan pembuangan lain di mana busa tersebut dapat menggantikan bahan PS yang diperluas. Pati dari sumber botani yang berbeda telah dipelajari dalam hal ini (Georges et al.2018; CruzTirado dkk.2019). Namun pati itu sendiri adalah polimer yang rapuh dan sensitif terhadap air, sehingga penggunaan pati termodifikasi dan campurannya dengan bioplastik atau pengisi lain dengan ketahanan mekanis dan air yang lebih baik telah dilaporkan secara luas. Soykeabkaew dkk. (2015) merangkum berbagai teknik pemrosesan, jenis modifikasi pati, dan banyak contoh pencampuran yang digunakan untuk mengatasi sifat buruk pati asli.

Untuk menghasilkan pati hidrofobik, asetilasi dan esterifikasi telah dipelajari oleh Bergel et al. (2018b). Penulis menemukan bahwa konten hingga 20% berat dari pati yang dimodifikasi mengurangi penyerapan air dan meningkatkan resistensi dampak, meskipun menghadirkan kepadatan yang lebih tinggi daripada busa pati asli. Demikian pula, Guan et al. telah mengusulkan busa komposit pati asetat baik dengan serat tongkol jagung dan selulosa (Guan dan Hanna2004) dan dengan PLA (Guan et al. 2005). Penulis ini mengevaluasi kondisi pemrosesan, jenis dan kuantitas aditif, dan tingkat asetilasi pati pada sifat pengemasan akhir. Pornsuksomboon dkk. (2016) dikembangkan.

Busa komposit 50/50 dengan pati singkong termodifikasi asam sitrat dan asli dengan stabilitas termal yang lebih tinggi dan penyerapan air yang lebih rendah, dan ketebalan dan kepadatan yang sama daripada busa pati asli. Karya terbaru lainnya menggunakan pati ikatan

silang dengan busa biokomposit selulosa, dengan sifat fleksi yang ditingkatkan dan ketahanan air untuk 5% berat. kandungan selulosa (Hassan et al.2019). Penulis lain telah menyarankan penggunaan pelapis bioplastik yang lebih hidrofobik dan tahan sebagai sarana untuk mengatasi karakteristik busa pati yang merugikan dengan hasil yang positif (Bergel et al.2017, 2018a).

Busa komposit pati yang dicampur dengan berbagai konsentrasi protein nabati, serat kraft, dan minyak sawit dipelajari oleh Kaisangsri et al. (2014) dengan tujuan meningkatkan kinerja mekanik dan ketahanan air dari biokomposit ini. Semua pengisi mengurangi penyerapan air dan indeks kelarutan air, terutama protein zein dan gluten, sementara serat kraft memberikan kekuatan lentur dan tekan tertinggi, namun ketahanan air secara signifikan lebih rendah daripada busa polistiren yang diperluas. Penulis yang sama mengembangkan busa biokomposit serat pati/kitosan/kraft dengan kepadatan

lebih rendah, penyerapan air lebih tinggi, dan ketahanan mekanik dan fleksibilitas yang lebih tinggi daripada busa pati dan biokomposit serat pati/kraft (Kaisangsri et al.2012). Demikian juga, Cruz-Tirado et al. (2017) menggunakan ampas tebu dan serat kulit asparagus sebagai penguat, meskipun tidak ada peningkatan signifikan yang diamati pada sifat mekanik hingga 40% pemuatan serat. Di sisi lain, Mello dan Mali (2014) telah memperoleh nampan dari pati singkong dan ampas tebu malt dengan thermo-moulding, dan telah mengevaluasi secara menyeluruh pengaruh keberadaan produk sampingan agroindustri ini pada sifat akhir dari nampan yang diperluas, menunjukkan bahwa penambahan 10% dari residu secara signifikan menurunkan higroskopisitasnya. Demikian pula, residu dari pengepresan kue wijen telah dimasukkan ke dalam bahan berbasis pati singkong yang diperluas (Machado et al.2017), menunjukkan bahwa penggabungan 20% atau lebih dari produk residu ini memberikan tempat pada

busa biokomposit dengan sifat mekanik yang sebanding dengan PS komersial yang diperluas.

Baru-baru ini, pengisi anorganik yang berbeda digunakan sebagai penguat busa komposit berbasis pati (Matsuda et al. 2013; Chiarathanakrit dkk.2019) serta sisa makanan terutama yang berbahan dasar kalsium, juga direvisi sebagai pengisi busa pati (Chiarathanakrit et al. 2018; Kaewtatip dkk.2018). Semua biokomposit menghasilkan densitas yang lebih tinggi, lebih tahan, dan bahan yang diperluas lebih stabil secara termal. Hebatnya, Kaewtatip et al. (2018) menemukan bahwa bubuk kulit telur adalah bahan pengisi yang lebih efektif daripada kulit udang atau kalsium karbonat komersial.

Pengisi alami dengan bioplastik biodegradable lainnya telah dilaporkan. Dalam sebuah karya baru-baru ini, Adu et al. (2019) mengembangkan biokomposit PVA/nanoselulosa yang sangat kuat dan sangat biodegradable dengan metode pembekuan yang

inovatif, meskipun penskalaan dan evaluasi biaya dari sistem manufaktur ini harus dianalisis. Selain itu, Bocz et al. (2016) mempelajari busa biokomposit PLA dengan selulosa dan serat basalt sebagai pengisi menggunakan CO₂ superkritis sebagai bahan pembusa, memperoleh bahan yang sangat berkembang dengan peningkatan kristalinitas daripada busa PLA yang rapuh. Namun, kinerja mekanik terbaik (uji kompresi) diperoleh ketika hanya bedak ditambahkan sebagai agen nukleasi, dikaitkan dengan pembentukan sel yang lebih homogen. Selanjutnya, busa biokomposit berdasarkan PBTA dan serat pohon palem persik (pertanian residu) diusulkan oleh Pereira da Silva et al. (2017), menunjukkan peningkatan sifat mekanik dengan dan tanpa perlakuan silan dari serat bila dibandingkan dengan serat alami lainnya. Namun, interaksi poymer/pengisi yang lebih baik dan dengan demikian sifat material akhir diperoleh untuk pengisi yang diolah.

Singkatnya, berbagai busa biokomposit telah dikembangkan dan dipelajari selama dekade terakhir, menjadi pati biopolimer yang paling banyak dilaporkan digunakan untuk aplikasi pengemasan karena biayanya yang relatif lebih rendah. Meskipun demikian, untuk meningkatkan komposit berbasis bio dan biodegradable ini, penyelidikan lebih lanjut tentang penggunaan berbagai agen pembusa yang hemat biaya, hemat energi, dan tidak berbahaya diperlukan.

4.3 Film Komposit Hijau Aktif

Tujuan utama dari pengemasan adalah untuk mempertahankan kebaikan produk. Desain kemasan, kualitas, dan efisiensi sangat penting dalam industri makanan karena harus memenuhi beberapa persyaratan, yang paling sering diatur secara ketat. Pengemasan makanan harus berusaha untuk memperpanjang umur simpan produk sebanyak

mungkin, mempertahankan karakteristik organoleptik dan nutrisinya, dan menjamin keamanan pangan. Ini harus melindungi produk dari kontaminasi bentuk pada setiap titik rantai pasokan makanan (misalnya, kontaminasi silang dengan produk makanan lainnya). Demikian juga, ia harus menyediakan konsumen dengan seluruh komposisi produk dan informasi produksi dan menarik dari sudut pandang pemasaran. Akibatnya, pasar menuntut berbagai persyaratan dan spesifikasi untuk pengemasan dan pelabelan makanan (Kalpana et al.2019). Pemilihan bahan kemasan yang tepat dapat membantu mengurangi limbah makanan dengan membantu konsumen membeli dalam jumlah yang tepat yang akan mereka konsumsi dan meminimalkan pembusukan makanan, sementara secara tidak langsung meminimalkan konsumsi energi dan air serta timbulan sampah plastik. Menurut perkiraan Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO, Perserikatan Bangsa-Bangsa), hampir setengah dari total kehilangan makanan di

seluruh dunia, yang meningkat menjadi sekitar 1,3 miliar ton per tahun, terjadi pada tahap pemrosesan, distribusi, dan konsumsi. Meskipun pengemasan yang cerdas dan aktif dapat membantu mengurangi limbah makanan, penggunaannya juga meningkatkan nilai pengemasan dan biaya produk secara keseluruhan, yang dalam setiap kasus diperlukan analisis biaya-manfaat.

Kemasan cerdas telah muncul sebagai sarana komunikasi informasi bagi produsen, pengecer, dan konsumen berdasarkan kemampuan mereka untuk merasakan, mendeteksi, dan merekam perubahan baik eksternal maupun internal pada produk (Majid et al. 2018). Sebagian besar indikator dimaksudkan untuk pendeteksian kesegaran dan kebocoran dengan indikator suhu atau pH, atau oleh gas headspace dan sensor biologis yang terintegrasi dengan pembawa data seperti kode batang dan tag identifikasi frekuensi radio (RFID). Tinjauan ekstensif dan terkini tentang bahan

kemasan cerdas baru-baru ini dilakukan oleh Kalpana et al. (2019), memberikan informasi berharga tentang berbagai jenis sensor dan pembawa data serta kombinasi pada bahan pengemas berbasis hayati dan konvensional yang dapat digunakan atau dipelajari untuk menyesuaikan sistem pengemasan cerdas untuk aplikasi tertentu.

Pada umumnya, pengemasan cerdas adalah jenis pengemasan aktif, artinya suatu senyawa dengan fungsi tertentu dimasukkan ke dalam bahan, biasanya polimer, yang mendeteksi dan juga memberi tahu konsumen bahwa beberapa indikator kesegaran atau keamanan produk telah diubah. selama transportasi, distribusi atau penyimpanan. Penggunaan kemasan aktif dalam makanan dimaksudkan untuk memperpanjang pengawetan produk menggantikan teknik pengolahan makanan konvensional yang mahal dan dapat mengubah kualitas gizi makanan atau menghasilkan modifikasi

karakteristik organoleptik yang tidak diinginkan (perlakuan termal dan tekanan tinggi, brining, pengasaman, dehidrasi dan pengawet aditif.). Bahan aktif biasanya diperoleh dengan pengembangan bahan komposit termasuk senyawa aktif itu sendiri atau partikel bahan lain yang mengandung zat aktif. Matriks polimer ini memiliki potensi untuk secara bertahap melepaskan zat aktif (antioksidan dan antimikroba) atau menyerap produk atau promotor degradasi makanan yang tidak diinginkan (etilen, oksigen, dan air) (Majid et al.2018).

Salah satu biopolimer yang paling banyak dipelajari dalam film makanan aktif adalah kitosan karena aktivitas antimikroba intrinsiknya. Kitosan adalah polimer biodegradable yang berasal dari kitin, yang dapat diekstraksi dari limbah makanan laut (produk samping pengolahan kerang) (Salaberria et al.2015). Biokompatibilitas dan aktivitas antimikroba kitosan telah mendorong pengembangan bahan komposit baru yang

inovatif untuk pembalut luka dan sistem penghantaran terkontrol obat (Jayakumar et al. 2011; Chen dkk.2013; Ghazaie dkk.2019; Zhang dkk.2019). Banyak bahan biokomposit berbasis kitosan dengan aktivitas antijamur dan antimikroba untuk aplikasi pengemasan telah diselidiki (Lopez et al.2014; Salaberria dkk.2015; Tan dkk.2015; Basu dkk.2017; Zhang dkk.2017; Niu dkk.2018; Moeini dkk. 2019; Wang dkk.2019). Basu dkk. (2017) mengembangkan bionanokomposit berbasis kitosan yang diperkuat dengan nanopartikel PLA yang sarat dengan quercetin (flavonoid dengan kapasitas bakterisida dan antioksidan), dengan kapasitas antioksidan lima kali lebih tinggi dan kapasitas pencegah mikroba, tanpa mengorbankan penghalang uap air dan kinerja mekanisnya. Demikian juga, komposit yang sepenuhnya biobased dan biodegradable dari kitosan, askorbat, dan metilselulosa dengan kapasitas penyerapan antioksidan dan sinar UV baru-baru ini dikembangkan (Tan et al.2020). Bahan komposit menarik

yang dibuat dengan polivinil alkohol (PVA) dan kitosan modifikasi garam amonium kuaterner (HACC) dirancang oleh Min et al. (2020) dengan aktivitas antifogging dan antimikroba. Karakteristik antifogging penting dalam kemasan makanan produk segar karena dua alasan yang jelas: kabut menghalangi pengamatan yang jelas dari produk dan pengembunan air pada permukaan kemasan juga dapat menyebabkan pertumbuhan bakteri dan jamur dan kerusakan makanan lebih lanjut. Saat ini, lapisan HACC/PVA diaplikasikan di atas nampan PET untuk membandingkan perpanjangan umur simpan stroberi (sebagai contoh pengawetan makanan segar) tetapi bisa juga diterapkan di atas nampan bioplastik untuk menghasilkan kemasan biokomposit yang sepenuhnya hijau.

Tren lain dalam bahan pengemas aktif untuk industri makanan melibatkan penambahan minyak atsiri alam sebagai senyawa aktif ke dalam matriks polimer

komposit berbasis bio. Roy dan Rhim (2019) mengembangkan film komposit gelatin/kurkumin dengan aktivitas antimikroba yang luar biasa terhadap bakteri patogen bawaan makanan serta aktivitas antioksidan yang baik. Sistem komposit co-antimikroba lain berdasarkan kitosan dan nanoselulosa termodifikasi resin pinus diusulkan oleh Niu et al. (2018). Bertentangan dengan harapan, Kamdem et al. (2019) menemukan bahwa inklusi carvacrol pada komposit kitosan/xilan tidak efektif untuk meningkatkan kapasitas antimikroba dari film. Berbagai biokomposit berbasis minyak esensial alami lainnya telah ditinjau oleh Chiralt dan Atar (2016).

Selanjutnya, bionanokomposit telah diselidiki untuk bahan kemasan yang cerdas dan aktif. Nanopartikel perak telah terbukti memiliki aktivitas antimikroba yang termasuk dalam matriks bioplastik yang berbeda (Ortega et al.2017; Chi dkk.2019; Liang dkk.2019; Yu dkk.2019; Ceran dkk.2020). Passaretti dkk. (2019) mengembangkan

bionanocomposites pati/bentonit (tanah liat alami) dengan kapasitas penghalang UV sebagai paket sekunder untuk melindungi produk minuman atau makanan berwarna yang rentan terhadap radiasi UV. Sebuah studi baru-baru ini menyajikan lembaran kraft kayu lunak yang tidak dikelantang yang difungsikan dengan nanopartikel emas sebagai bahan kemasan antioksidan, menghasilkan proses manufaktur hijau integral (Bumbudsanpharoke dan Ko2018). Biokomposit antimikroba dengan nanopartikel seng oksida dikembangkan dengan matriks polimer yang berbeda: kitosan (Al-Naamani et al. 2016); gelatin (Ejaz et al.2018); PVA/pati dengan kapasitas penginderaan pH (Jayakumar et al.2019); PLA/PCL (Ahmed et al.2019); poliuretan dan kitosan berbasis hayati (Saral Sarojini et al.2019). Banyak karya inovatif dan menarik lainnya baru-baru ini diulas oleh Youssef dan El-Sayed (2018). Namun, karena nanopartikel menghadirkan difusivitas tinggi, pelepasannya selama penggunaan dan akhir masa pakai material dan

dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan saat ini sedang dipelajari secara menyeluruh (Han et al.2018; Yu dkk.2019), namun penelitian lebih lanjut tentang nanopartikel dan sistem polimer yang berbeda diperlukan.

4.4 Filamen Komposit Pencetakan 3D

Baru-baru ini, pencetakan 3D telah muncul sebagai teknologi yang menarik untuk berbagai aplikasi baru. Beragam bahan dari termoplastik konvensional dan bioplastik hingga keramik dan logam adalah beberapa bahan yang dapat dicetak 3D. Ulasan yang menarik dan lengkap oleh Lee et al. (2017) merangkum berbagai teknologi dan bahan pencetakan 3D yang dikembangkan hingga saat ini, dasar pengoperasiannya, resolusi dan kecepatan fabrikasi, konsumsi energi, properti, dan dengan demikian kelayakan penerapannya. Pencetakan 3D menawarkan kemungkinan untuk mendapatkan

produk yang disesuaikan dengan cara yang relatif cepat dan biaya rendah, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan reproduktifitas presisi tinggi dan desain, seperti biomedis dan elektronik, meskipun saat ini semakin banyak digunakan untuk desain produk besar-besaran untuk pertanian, perawatan kesehatan , otomotif, dan industri kedirgantaraan (Sahrubudinh et al.2019).

Meskipun, sejumlah besar pekerjaan penelitian pada berbagai bahan 3D telah dipenuhi dan ditinjau dalam literatur akhir-akhir ini (Lee et al. 2017; Bekas dkk.2019; Dai dkk.2019; Liu dkk.2019; Sahrubudinh dkk.2019), beberapa penelitian telah dilaporkan pada bahan biokomposit untuk pencetakan 3D. Filamen biokomposit PLA dengan serat organik alami telah dikembangkan dengan aplikasi pengemasan yang potensial (Murphy dan Collins 2018; Le Duigou dkk.2019; Xiao dkk.2019). Biokomposit berbasis selulosa juga telah dievaluasi untuk

potensi pencetakan 3D menjadi matriks polimer serbaguna untuk pengembangan bionanokomposit untuk pengemasan cerdas (Dai et al.2019). Demikian juga, biokomposit PLA/lignin antioksidan dikembangkan oleh Domínguez-Robles et al. (2019) untuk aplikasi farmasi dan biomedis, meskipun bahan serupa dapat dipelajari untuk bahan kemasan hijau aktif. Pencetakan 3D bionanokomposit hijau memiliki potensi besar untuk digunakan dalam kemasan aktif dan cerdas, namun penyelidikan lebih lanjut pada desain biokomposit dan teknologi pencetakan 3D serta optimasi kondisi operasi diperlukan.

5 Pertimbangan Dampak Lingkungan

Sayangnya, ada perbedaan sehubungan dengan apakah "biokomposit hijau" adalah bahan yang sepenuhnya berkelanjutan karena dua alasan utama:

1. Kemampuan daur ulangnya terbatas karena degradasi termal dalam siklus pemrosesan ulang yang berurutan.
2. Biodegradabilitasnya terkadang terbatas hanya pada bahan pengisi (bila matriks polimer berbasis bio tetapi tidak dapat terurai secara hayati) dan karena proses pengomposan tidak selalu terintegrasi dengan sistem pengelolaan limbah.

Oleh karena itu, penggunaan bahan yang sepenuhnya berbasis bio dan biodegradable serta peningkatan sistem dan peraturan pengelolaan limbah, bersama dengan pendidikan kesadaran ekologis dari produsen, pengecer, dan konsumen sangat penting untuk memajukan bahan kemasan yang lebih berkelanjutan. Baru-baru ini, ada kecenderungan yang berkembang dari konsumen untuk memilih barang-barang yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dan, di atas semua itu, pembeli yang lebih

sadar secara ekologis menyatakan bahwa mereka ingin membayar lebih untuk produk ini (Han et al.2009). Hal ini penting mengingat bioplastik, dan dengan demikian biokomposit hijau yang dihasilkan darinya, masih memberikan harga yang tinggi dibandingkan dengan polimer konvensional. Karena pasar bioplastik yang berkembang, harga perlahan-lahan turun, namun pengurangan biaya lebih lanjut diperlukan untuk mendapatkan harga yang kompetitif (La Mantia dan Moreale2011). Pilihan yang lebih ekologis dan ekonomis adalah penggunaan biomassa residu dari proses industri saat ini sebagai bahan baku biokomposit hijau, dengan tujuan mengurangi biaya serta mengembangkan proses dengan pembangkitan limbah minimum menuju sistem produksi sirkular, terutama dalam hal bahan yang dapat terurai secara hayati.

Sejalan dengan itu, seperti yang dinyatakan sebelumnya, penggunaan polimer dan pengisi berbasis bio

menghadirkan berbagai keuntungan lingkungan, terutama karena karakternya yang dapat terurai secara hayati, yang membantu mengurangi produksi limbah plastik dan penggunaan sumber daya berbasis fosil, meminimalkan jejak karbon. Aspek-aspek ini telah diselidiki lebih lanjut oleh penilaian siklus hidup (LCA) dari berbagai bahan biobased dan biokomposit yang dirancang khusus untuk aplikasi pengemasan (Zabaniotou dan Kassidi2003; Bohlmann 2004; Tencati dkk.2016; De Oliveira dkk.2019). Dampak produksi pertanian dari sebagian besar senyawa berbasis hayati harus dipertimbangkan dalam LCA bahan biokomposit hijau, menjadi eutrofikasi, penggunaan pupuk dan pestisida, dan penggunaan dan degradasi air dan tanah merupakan faktor dampak lingkungan utama untuk kegiatan ini. Selain itu, penggantian polimer komoditas untuk matriks biodegradable atau dimasukkannya bahan pengisi alami biasanya memerlukan modifikasi fisik atau kimia dari senyawa untuk mendapatkan sifat yang serupa

atau ditingkatkan dibandingkan dengan bahan konvensional. Perawatan ini menyiratkan biaya produksi tambahan dan terkadang tidak ramah lingkungan.

Oleh karena itu, idealnya penelitian di masa depan harus dilakukan dengan fokus tidak hanya pada sifat mekanik, termal, dan penghalang dari bahan yang dikembangkan tetapi juga pada biodegradabilitasnya dalam kondisi pengomposan. Selain itu, analisis efek keseluruhannya terhadap kondisi tanah juga relevan; toksisitas dan kompatibilitas lingkungan dari aditif apa pun yang digunakan; penilaian konsumsi energi dan sumber daya (air, tanah, dll.) baik dalam perolehan bahan baku maupun pemrosesan biokomposit; dan analisis siklus hidup global produk dengan mempertimbangkan dampak pembuatan bahan baku dan akhir masa pakai yang sebenarnya dari setiap bahan yang diproduksi dengan sistem pengelolaan limbah yang diterapkan saat ini.

6 Kesimpulan dan Perspektif Masa Depan

Sudah menjadi rahasia umum bahwa setiap aktivitas manusia memiliki dampak terhadap lingkungan. Kesadaran global akhir-akhir ini dibangkitkan atas konsekuensi yang dibawa oleh sistem sosial ekonomi saat ini. Akibatnya, keberlanjutan saat ini dianggap sebagai pedoman untuk pembangunan dunia saat ini dan masa depan. Konsep keberlanjutan menyiratkan komitmen solidaritas dengan generasi mendatang, mencapai pertumbuhan sosial ekonomi dan budaya yang diinginkan sambil memanfaatkan sumber daya alam yang ada secara rasional, melestarikan spesies dan lingkungan. Dalam hal ini, ada kecenderungan di seluruh dunia menuju pembuatan peraturan yang ditujukan untuk sirkularitas sistem produksi. Tujuan dari sistem sirkular adalah untuk menjaga produk, bahan, dan

sumber daya (air, energi) dalam sirkulasi selama mungkin.

Desain dan produksi kemasan memainkan peran penting dalam hal ini, karena kemasan (bahan sekali pakai) merupakan sumber penting dari limbah padat. Pengembangan material komposit berbasis bio dan biodegradable diperlukan untuk kemasan yang lebih ramah lingkungan. Penelitian terhadap pengembangan bahan dengan sifat yang dioptimalkan dalam hal pelestarian produk, penggunaan sumber daya minimum, dan produksi limbah secara keseluruhan buaian ke kuburan jalan akan menghasilkan bahan kemasan yang lebih bertanggung jawab secara ekologis. Ini menyiratkan pengurangan penggunaan energi, air, dan tanah dalam pembuatan bahan baku, transportasi dan distribusi, penyimpanan dan penjualan eceran, konsumsi dan pembuangan baik produk maupun kemasannya.

Biobasedmaterials membantu mengubah produk primer menjadi produk bernilai tambah, terutama ketika sisa biomassa digunakan sebagai bahan baku biokomposit. Ini adalah sebuah kesempatan tumbuh yang penting bagi negara-negara berkembang di mana pertanian merupakan salah satu kegiatan ekonomi utama, memainkan peran sentral dalam penjabaran strategi menuju pasar yang lebih adil dalam perspektif pembangunan berkelanjutan. Selain itu, senyawa turunan biomassa memiliki dampak lingkungan bersih yang lebih rendah, meskipun lebih banyak praktik ekologis sedang dipromosikan juga dalam produksi pertanian untuk mengurangi timbulan limbah padat, eutrofikasi air, dan masalah penipisan tanah.

Di sisi lain, karakter biodegradabilitas biokomposit hijau dapat membantu mengurangi timbulan sampah plastik yang berasal dari industri pengemasan jika sistem pengomposan yang memadai diintegrasikan ke dalam

program pengelolaan sampah. Aditif dan proses yang tersirat dalam pembuatannya juga harus sebisa mungkin tidak berbahaya untuk mencapai bahan yang benar-benar ramah lingkungan.

Akhirnya, keserbagunaan bahan biokomposit yang luar biasa memungkinkan pengembangan bahan kemasan yang disesuaikan untuk produk yang berbeda serta alternatif cerdas dengan sifat yang ditingkatkan, sehingga memastikan kualitas, keutuhan, integritas, dan keamanan produk untuk waktu yang lebih lama. Singkatnya, pengembangan biokomposit hijau untuk industri pengemasan dapat memenuhi persyaratan keberlanjutan masyarakat modern.

Referensi

Adu C, Rahatekar S, Filby J et al (2019) Structural packaging foams prepared by uni-directional freezing of paper sludge cellulose nanofibres and poly (vinyl alcohol). Mater Lett 253:242–245.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.06.050>

Agustin-Salazar S, Cerruti P, Medina-Juárez LÁ et al (2018) Lignin and holocellulose from pecan nutshell as reinforcing fillers in poly (lactic acid) biocomposites. Int J Biol Macromol 115:727–736.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.120>

Ahmed J, Mulla M, Jacob H et al (2019) Polylactide/poly(ϵ -caprolactone)/zinc oxide/clove essential oil composite antimicrobial films for scrambled

egg packaging. Food Packag Shelf Life 21:100355.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100355>

Akrami M, Ghasemi I, Azizi H et al (2016) A new approach in compatibilization of the poly(lactic acid)/thermoplastic starch (PLA_TPS) blends. Carbohydr Polym 144:254–262. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.02.035>

Al-Naamani L, Dobretsov S, Dutta J (2016) Chitosan-zinc oxide nanoparticle composite coating for active food packaging applications. Innov Food Sci Emerg Technol 38:231–237. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.010>

Aliotta L, Cinelli P, Coltelli MB, Lazzeri A (2019) Rigid filler toughening in PLA-calcium carbonate composites: effect

of particle surface treatment and matrix plasticization.
Eur Polym J 113:78–88.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.12.042>

Anugwom I, Lahtela V, Kallioinen M, Kärki T (2019) Lignin as a functional additive in a biocomposite: influence on mechanical properties of polylactic acid composites. Ind Crops Prod 140.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111704>

Arrieta MP, Fortunati E, Dominici F et al (2014) PLA-PHB/cellulose based films: mechanical, barrier and disintegration properties. Polym Degrad Stab 107:139–149.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.05.010>

Ashori A, Nourbakhsh A (2010) Reinforced polypropylene composites: effects of chemical compositions and particle size. *Bioresour Technol* 101:2515–2519.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.02>

BAB 2

BANGUNAN SUSTAINABILITY

Penerapan bahan bangunan tak terbarukan termasuk beton dan logam dalam industri konstruksi telah menyebabkan dampak besar terhadap lingkungan termasuk penghancuran lebih dari 45% sumber daya global, konsumsi 35% energi dan hampir 40% energi-emisi terkait (Panel Tingkat Tinggi Sekretaris Jenderal PBB tentang Global 2012). Untuk membantu mengurangi dampak yang meluas ini, sektor bangunan mulai mempertimbangkan tiga pengurangan dampak mengerikan ini melalui peningkatan bahan bangunan ramah lingkungan dengan Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRP), khususnya melalui WPC (Wood Polymer Composites) sejak tahun 90-an.

Penggunaan serat alam dalam bentuk komposit di sektor bangunan secara historis diterapkan sejak frasa waktu ketika jerami dan lumpur dicampur untuk membentuk batu bata pertama yang diketahui dalam sejarah. Setelah ditemukannya semen, semen menjadi bahan dominan terbesar di industri sampai saat ini, meskipun kerusakan lingkungan yang sangat besar. Serat alam (NF) telah banyak diterapkan dalam aplikasi non-struktural. Demikian, makalah ini membahas penerapan skenario perkuatan dalam bentuk perkuatan inti dan vinir baru untuk meningkatkan kapasitas dukung beban untuk mencapai sifat mekanik yang lebih baik yang dapat memungkinkan pembangunan sistem konstruksi demoshell. Dalam penelitian ini komposit polimer diperkuat serat alam (NFRP) yang dihasilkan dari residu pertanian berupa serat jerami (SF) dicampur dengan tiga jenis polimer yang berbeda antara lain (polilaktida (PLA), TPE (polimer elastis termoplastik) dan polietilen densitas tinggi. (HDPE)) dikembangkan melalui proses ekstrusi,

kemudian dilaminasi atau dilapisi untuk meningkatkan sifat material yang perlu dicapai untuk diterapkan pada struktur penahan beban. Polimer elastis termoplastik (TPE) diterapkan untuk meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas dalam mencapai geometri canggih. Itu Dalam penelitian ini komposit polimer diperkuat serat alam (NFRP) yang dihasilkan dari residu pertanian berupa serat jerami (SF) dicampur dengan tiga jenis polimer yang berbeda antara lain (polilaktida (PLA), TPE (polimer elastis termoplastik) dan polietilen densitas tinggi. (HDPE)) dikembangkan melalui proses ekstrusi, kemudian dilaminasi atau dilapisi untuk meningkatkan sifat material yang perlu dicapai untuk diterapkan pada struktur penahan beban. Polimer elastis termoplastik (TPE) diterapkan untuk meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas dalam mencapai geometri canggih. Itu Dalam penelitian ini komposit polimer diperkuat serat alam (NFRP) yang dihasilkan dari residu pertanian berupa serat jerami (SF) dicampur dengan tiga jenis polimer yang

berbeda antara lain (polilaktida (PLA), TPE (polimer elastis termoplastik) dan polietilen densitas tinggi. (HDPE)) dikembangkan melalui proses ekstrusi, kemudian dilaminasi atau dilapis untuk meningkatkan sifat material yang perlu dicapai untuk diterapkan pada struktur penahan beban. Polimer elastis termoplastik (TPE) diterapkan untuk meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas dalam mencapai geometri canggih. Itu a TPE (Thermoplastic elastic polymer) dan high-density polyethylene (HDPE)) dikembangkan melalui proses ekstrusi, kemudian dilaminasi atau dilapis untuk meningkatkan sifat material yang perlu dicapai untuk diterapkan pada struktur penahan beban. Polimer elastis termoplastik (TPE) diterapkan untuk meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas dalam mencapai geometri canggih. Itu sebuah TPE (Thermoplastic elastic polymer) dan highdensity polyethylene (HDPE)) dikembangkan melalui proses ekstrusi, kemudian dilaminasi atau dilapis untuk meningkatkan sifat material yang perlu dicapai

untuk diterapkan pada struktur penahan beban. Polimer elastis termoplastik (TPE) diterapkan untuk meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas dalam mencapai geometri canggih.

Kekuatan mekanik dikendalikan oleh veneering. Sifat material yang ditargetkan dan dicapai diterapkan dalam simulasi struktural yang kemudian digunakan dalam memprediksi kinerja struktural dari konstruksi cangkang eksperimental fisik yang dibangun untuk memvalidasi hipotesis yang ditetapkan tentang kekuatan inti lignoselulosa elastis/semielastis untuk diterapkan pada beban- sistem bantalan. Makalah ini akan menyoroti pengembangan dan pengujian sampel material, diikuti dengan analisis dan interpretasi terhadap kemungkinan penggunaan dan peranti dalam struktur penahan beban. Akhirnya, demonstrator yang dibangun secara fisik dalam bentuk konstruksi cangkang eksperimental

diilustrasikan secara singkat untuk menunjukkan validitas hipotesis yang diselesaikan.

1. Pendahuluan

Bahan biokomposit, yaitu komposit polimer yang diperkuat serat alami (NFRP) (Dahy 2017a, b) adalah bahan yang dibuat dari setidaknya dua komponen utama, serat dan matriks (juga dikenal sebagai pengikat), di mana setidaknya salah satu dari dua komponen utama berbasis biomassa. Konsumsi kayu di seluruh dunia menjadi dipertanyakan sejak akhir abad kedua puluh. Hal ini disebabkan oleh tren internasional dalam melestarikan hutan dan mempertahankan keseimbangan eko-kehidupan yang dibutuhkan melalui perubahan perilaku kehutanan dan jumlah kayu yang dikonsumsi setiap tahunnya. Oleh karena itu, pencarian sumber serat alam terbarukan yang tersedia setiap tahun menjadi tuntutan internasional.

Di sisi lain dan karena bahan padat sumber daya seperti baja, beton, dll. masih dan masih merupakan bahan bekas yang dominan dalam industri bangunan, berbagai teknologi baru yang muncul berdasarkan aplikasi biokomposit mulai berkembang sejak tahun 1990-an, yaitu Wood Polymer Composites (WPC) (Vogt, C. Komposit Plastik Kayu (WPC) 2020) dari kayu dan residu pertanian yang dihasilkan setiap tahun seperti ikatan jerami oleh termoplastik.

Biokomposit yang menggunakan serat lignoselulosa panjang dimulai di industri otomotif oleh Ford pada 1940-an, kemudian memudar selama beberapa dekade hingga dimulai kembali pada 1990-an. Hanya beberapa contoh yang telah direalisasikan dalam industri bangunan. Salah satunya adalah jembatan penyeberangan yang dibuat oleh Universitas Teknologi Eindhoven (Blok dan Teuffel 2017). Gelagar jembatan utama terdiri dari serat rami dan rami yang melekat pada

inti busa berbasis Polylactic Acid (PLA). Contoh lain adalah Paviliun Penelitian BioMat yang selesai dibangun pada tahun 2018 di Kampus Universitas Stuttgart (Dahy2019a, b) serta BioMat Tailored Fiber Placed (TFP) Biocomposite Camopy yang direalisasikan pada tahun 2019 (Dahy et al. 2020).

Biokomposit hijau adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan bahwa komponen utama biokomposit (serat dan pengikat) sama-sama berbasis biomassa. Dalam hal ini, nilai positif dari penerapan komposit tersebut menjadi dua kali lipat. Salah satu bahan yang dikembangkan yang dibahas di sini dalam bab ini adalah biokomposit hijau yang juga telah dilapis dan diuji secara mekanis.

2 Persiapan Bahan

Tiga bahan NFRP disiapkan menggunakan 70-80% serat jerami berat. dengan ukuran serat 1-5 mm. Campuran dibuat dengan mencampur kering komponen asli kemudian langsung mengekstrusi komposisi menggunakan ekstruder lab ulir ganda tanpa pra-pelet biokomposit. Tiga jenis polimer digunakan untuk produksi termasuk polilaktida (PLA), polimer elastis termoplastik (TPE) berbasis PVA (Polyvinyl Acetate) serta matriks polimer high-density polyethylene (HDPE), (Tabel1). Sebelum ekstrusi, pra-pencampuran serat jerami dan matriks polimer dengan kopleng dan agen pelumas dilakukan. Semua sampel biokomposit diekstrusi pada kecepatan ekstrusi rata-rata 18 cm/menit, suhu berkisar antara 120-160 °C dan gaya tekan yang beragam mulai dari 30-140 Bar diterapkan untuk mencapai campuran homogen akhir dengan profil ekstrusi yang dapat diterima tanpa visiner. gas udara

yang terperangkap di permukaan. Uji mekanis dilakukan pada tiga muatan biokomposit yang secara visual dan kualitatif telah diseleksi dan diperiksa, menunjukkan kualitas terbaik dari rangkaian muatan yang telah digabungkan pada rasio serat lebih lanjut yang berbeda dari yang terakhir dipilih yang diberikan di sini.

Tabel 1 Biokomposit persiapan sampel

Biaya	Komposisi bahan	Persentase (%)
1	Serat jerami (SF) Polimer elastis termoplastik (TPE)	80 20
2	Serat jerami (SF) Polilaktida (PLA) Polimer elastis termoplastik (TPE) (Agen kopling)	70 15 13 2
3	Serat jerami (SF) Polietilen densitas tinggi (HDPE) (Agen kopling)	70 28 2

2.1 Proses Laminasi Material Melalui Veneering

Laminasi adalah proses dasar yang dikenal dan diterapkan dalam bahan bangunan konstruksi, termasuk produk balok kayu laminasi yang dikenal. Dalam

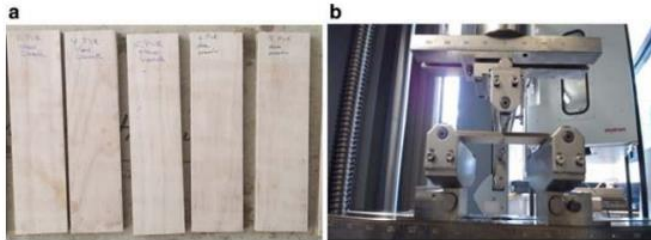
penelitian ini, proses laminasi vakum diterapkan untuk meningkatkan sifat mekanik dan kekuatan melalui pelapisan sampel NFRP yang diekstrusi. Sebelum pelapisan melalui lem berbasis PVA yang dipilih, bahan biokomposit yang diekstrusi digosok untuk mengaktifkan reaksi permukaan kapiler untuk meningkatkan proses perekatan. Proses laminasi veneering dibantu dengan alat vakum. Kehadiran pompa vakum membantu menghilangkan kantong udara di antara lapisan sandwich, yang terdiri dari NFRP inti yang diekstrusi dan dua lapisan veneer kayu ek di kedua sisi. Veneer itu sendiri diperkuat dengan benang plastik dari sisi belakang, yang membantu dalam penguatan lebih lanjut dari seluruh panel sandwich sesuai kebutuhan. Menerapkan vakum juga membantu mencapai permukaan berkualitas tinggi dan proses berlangsung selama setengah jam kemudian dibiarkan di bawah tekanan selama 24 jam sampai proses pengerasan lem selesai.

3 Standar Persiapan Spesimen Uji

Sampel uji disiapkan dan dikalibrasi sesuai dengan norma DIN EN 325:1993, standar panel berbasis kayu (DIN EN 1993). Sampel diukur menggunakan kaliper digital dengan ketelitian 0,01. Karena ketidakrataan ekstrusi, ketebalan sampel diukur dari empat titik sepanjang panjang dan nilai rata-rata ketebalan dihitung sesuai, kemudian diketik sebagai input dalam mesin pengukur yang digunakan. Ini adalah salah satu langkah yang diperlukan untuk pengujian sebelum pengujian lentur untuk dapat menentukan modulus elastisitas. Kondisi kalibrasi lebih lanjut termasuk mempersiapkan sampel pada kelembaban relatif (65 ± 5)% dan suhu (23 ± 1) °C.

3.1 Uji Tekuk

Lima sampel disiapkan dari inti material yang telah ditentukan sebelumnya yang disajikan pada Tabel 1 dan dilapisi dengan veneer kayu ek dari kedua sisi untuk membuat panel sandwich yang ditunjukkan pada (Gbr. 1a) seperti yang dijelaskan dalam 2.1 melalui penyedotan debu. Serat veneer berorientasi pada serat, yang berbeda dengan orientasi serat bebas dari inti yang diekstrusi. Sebuah mesin bending Universal (Zwick Z1455) setup untuk uji bending tiga titik menurut standar yang telah disebutkan sebelumnya diterapkan dengan ini. Pengaturan uji pembengkokan termasuk pengaturan jarak 100 mm antara kedua penyangga bawah. Silinder pendukung atas mesin adalah $15 \pm 0,5$ mm dan diameter silinder pemuatan juga $30 \pm 0,5$ mm. Kecepatan pemuatan eksural diatur ke 25 mm/mnt dengan pra-beban $0,1 \text{ N/mm}^2$, sesuai dengan standar pengujian DIN EN 310:1993, panel berbasis k.



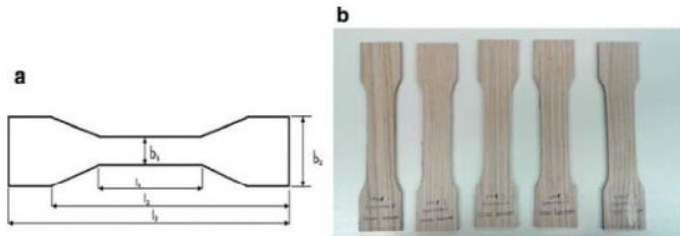
Gambar 1 a Benda uji lentur setelah laminasi, **b** spesimen di bawah uji tekuk tiga titik

dengan pra-beban $0,1 \text{ N/mm}^2$ sesuai dengan standar pengujian DIN EN 310:1993, panel berbasis kayu; untuk penentuan modulus elastisitas lentur dan kuat lentur (DIN EN1993).

3.2 Uji Tarik

Uji tarik dilakukan pada mesin uji universal yang diatur menurut standar uji tarik DIN EN 789 untuk panel berbahan dasar kayu (DIN EN 2004). Pengaturan mesin penguji di bawah kecepatan uji seragam 10 mm/menit dengan pra-beban $0,01 \text{ N/mm}^2$ pada suhu kamar ($23 \pm 1^\circ\text{C}$). Lima sampel yang diuji memiliki bentuk seperti tulang potongan melintang sesuai dengan Gambar. 2.

Dimensi benda uji tarik: $b_2 = 42$ mm, $b_1 = 28$ mm, $l_3 = 210$ mm, $l_2 = 171$ mm, $l_1 = 90$ mm dan $t = 6$ mm.



Gambar 2 a Dimensi benda uji untuk uji tarik dan **b** spesimen uji tarik setelah veneering

sampel	jumlah dari spesimen	Elastisitas modulus (GPa)	Modulus tarik (IPK)
1	5	1,8–2,5	-
2	5	4,5–5,2	1.1–1.5
3	5	5.5–6.3	1.4–2.8

4 Hasil Tes dan Pembahasan

4.1 Uji Tekuk

Tabel 2 di atas menunjukkan modulus elastisitas setelah uji tekuk tiga titik untuk lima benda uji dari masing-

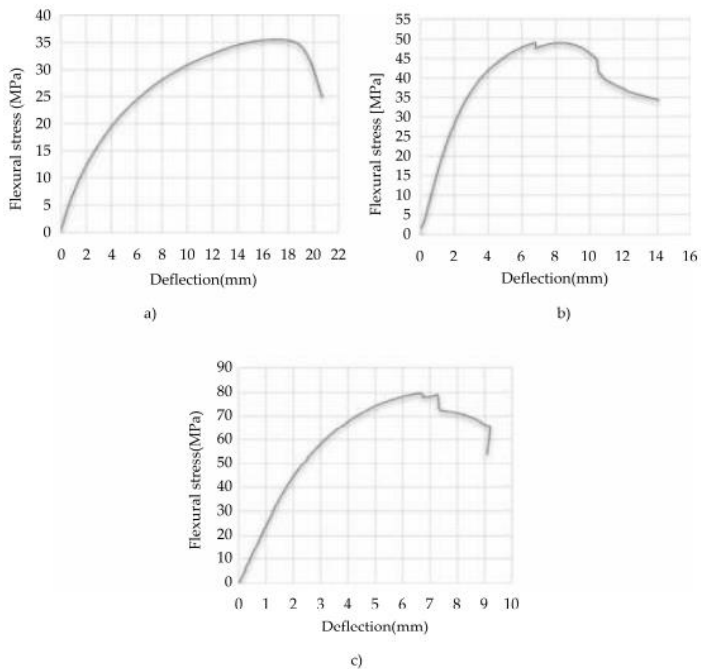
masing muatan material seperti yang didefinisikan dalam 3.1. Sebagian besar sampel rapuh sebelum pelapisan, kemudian kinerja putus ditingkatkan melalui penguatan pelapisan. Untuk sampel pertama, spesimen telah menunjukkan kinerja kekuatan yang baik dalam tegangan tekan dari gaya lentur yang diterapkan (Gbr.3a), menunjukkan deformasi elastis yang jelas karena sifat elastis yang sudah sangat ada dalam TPE yang diterapkan. Pada sampel kedua, terlihat adanya patahan seperti getas dan ketahanan tegangan lentur yang lemah. Pada sampel ketiga, komposisi serat jerami (SF) dan HDPE kompatibel, dan komposit NFRP yang dihasilkan di sini telah menunjukkan ketahanan tegangan lentur tertinggi bahkan sebelum pelapisan dilakukan. SF dan HDPE ditemukan biokomposit terbaik yang dikembangkan dalam hal ini dengan kinerja mekanik terbaik. Dalam pengujian dan saat putus, terjadi delaminasi, yang sebagian besar terjadi pada lapisan

bawah akibat tegangan tarik yang terjadi selama kondisi pembebanan.

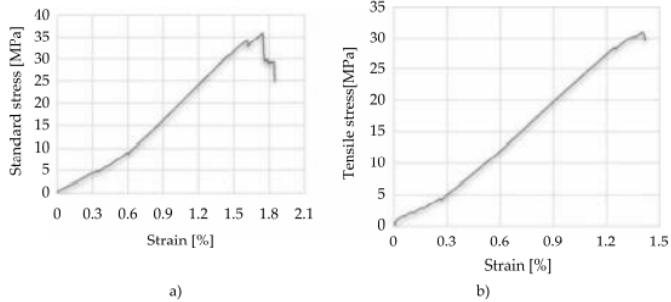
4.2 Uji Tarik

Selama pelapisan, perekat diterapkan dan metode yang digunakan untuk mengaktifkan lapisan di mana adhesi diterapkan, terutama inti, semuanya memainkan peran penting dalam meningkatkan kekuatan biokomposit NFRP. Nilai kekuatan tarik sampel veneer kedua adalah sekitar 1,1-1,5 GPa. Dalam Gambar.4a, sampel 2 dari SF dan PLA telah menunjukkan deformasi yang tinggi. Kekuatan tarik rata-rata sampel biokomposit ketiga dari SF dan HDPE berkisar antara 1,4-2,8 GPa setelah pelapisan diterapkan (Tabel2) dan modulus elastisitasnya meningkat 10 kali lipat setelah dilakukan pelapisan dibandingkan dengan pengukuran sebelumnya tanpa pelapisan atau perkuatan. Patut disebutkan bahwa kegagalan sebagian besar terlihat dalam bentuk delaminasi dan pada lapisan veneer itu sendiri, yang

mencerminkan bahwa inti biokomposit tidak dapat menahan beban tarik sendiri. Hal ini menunjukkan ruang lingkup dalam makalah ini, bahwa hanya melalui pelapisan pada campuran inti biokomposit yang sesuai dan dengan kondisi perekatan dan jenis lem yang sesuai, kinerja mekanis yang canggih dapat dicapai.



Gambar 3 Tegangan lentur versus grafik defleksi **Sebuah** sampel 1, **b** sampel 2 dan **c** sampel 3



Gambar 4 Tegangan tarik versus grafik regangan Sebuah sampel 2 dan b sampel 3

Karenanya elemen penahan beban dikembangkan ketika diterapkan dengan benar dalam kondisi pembebanan tertentu yang sesuai seperti yang diuji di Paviliun BioMat 2018 dalam bentuk sistem konstruksi cangkang seperti yang ditunjukkan pada bagian 5.

5 Aplikasi Potensial dalam Struktur Bangunan Berkelanjutan

Dalam konstruksi berkelanjutan, biokomposit dapat digunakan untuk struktur penahan beban kecil seperti struktur jembatan penyeberangan (Blok dan Teuffel 2017), sistem kelongsong, pelapis lantai dan furnitur bentuk bebas dari (Bioflexi) pengembangan lain oleh penulis (Dahy dan Knippers 2016; Horn dkk.2018).

Eksperimen yang disajikan adalah bagian dari Proyek Penelitian 'BioProfil' yang didanai oleh Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) dan dilakukan di University of Stuttgart, oleh Department of BiobasedMaterials andMaterials Cycles in Architecture (BioMat) di Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), dipimpin oleh direktur BioMat, penulis. Proyek BioProfile mengejar penelitian tentang profil ekstrusi dan koekstrusi untuk bingkai jendela dan aplikasi arsitektur eksterior, terutama panel fasad, yang terbuat

dari sisa tanaman sebagai sumber serat alami yang diperkuat oleh biopolimer. Profil yang diekstrusi yang dianalisis dalam makalah ini berlangsung di pusat Fraunhofer-WKI di Braunschweig di Jerman dengan bantuan ETS dan BioMat perusahaan.

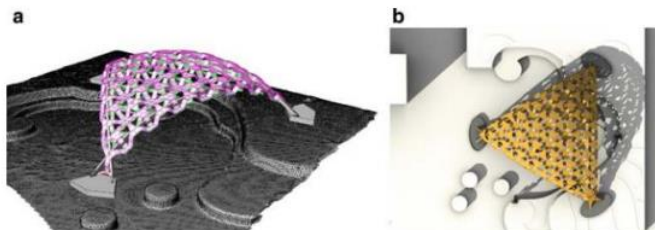
Selama studi penelitian ini, BioMat mewujudkan Paviliun Eksperimental Biokomposit, yang merupakan struktur penahan beban eksperimental yang dibuat menggunakan biokomposit. Paviliun yang direalisasikan pada tahun 2018 ini berupa struktur cangkang setinggi 3,6 m dengan bentang 9,5 m, seluas 55 m². Itu terletak di kampus Universitas Stuttgart di pusat kota antara Agustus–Desember 2018, seperti yang ditunjukkan pada (Gbr. 10). Fitur khususnya adalah konstruksi modular dari elemen lengkung tunggal yang ringan yang membentuk cangkang lengkung ganda dengan segmen individu yang terdiri dari inti biokomposit elastis/semi-elastis yang

diperkuat veneer. Struktur ini didukung oleh tiga balok silang.

Nilai target asli untuk penyelesaian geometri global cangkang bergantung pada hasil pengembangan material yang diberikan dalam makalah ini. Strategi penguatan melalui pelapisan yang memungkinkan inti elastis/semi-elastis asli mencapai kinerja mekanis yang lebih tinggi ditetapkan sebagai parameter utama dalam keseluruhan pengembangan konstruksi cangkang.

Simulasi struktural awal mengintegrasikan sifat-sifat material tersebut, yang telah menunjukkan bahwa biokomposit yang dikembangkan tidak akan memungkinkan lapisan cangkang tunggal, oleh karena itu lapisan struktural kedua dikembangkan dan melekat pada yang pertama. Interkoneksi dan pelapisan ganda ini memungkinkan distribusi beban yang homogen ke segala arah. Kehadiran tiga balok laminasi bersilangan sangat penting dan beban dipindahkan ke tiga rekaman pondasi

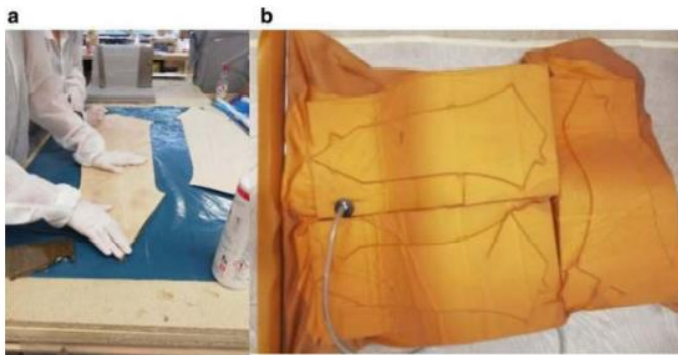
superfisial yang terletak pada ketinggian yang berbeda, sesuai dengan kondisi lokasi yang ada (Gbr. 1).5). Model parametrik cangkang dikembangkan menggunakan perangkat lunak Rhinoceros dan Grasshopper.



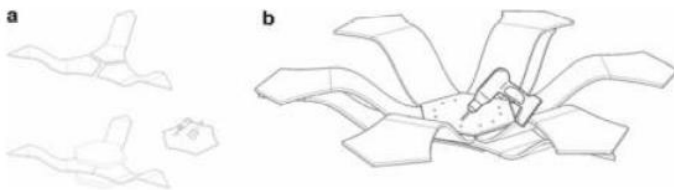
Gambar 5 Model parametrik dari geometri global dari cangkang yang dirancang **Sebuah** tampilan perspektif pada data pindai laser 3D dan **b** tata letak model

Memungkinkan kontrol atas jumlah variasi elemen berkaki tiga (Dahy et al. 2019a, b). Dalam (Gbr.6), pembuatan satu elemen diilustrasikan dan dalam (Gbr. 7), kombinasi elemen dalam satu unit diilustrasikan. Akibatnya, 360 panel untuk elemen berkaki tiga: elemen atas, elemen bawah, elemen tepi atas dan elemen tepi bawah dibuat (Gbr.8a) dan panel dirakit dalam 4 tahap

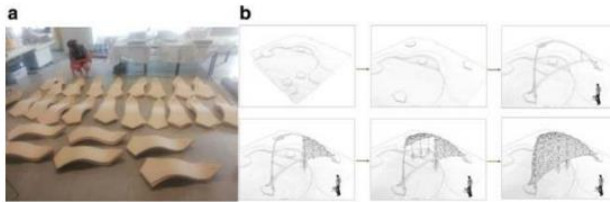
(Gbr. 8b). Dalam (Gbr.9) detail hubungan antara panel biokomposit dan balok struktural kayu diilustrasikan dan dalam (Gbr. 10) paviliun eksperimental terakhir ditampilkan.



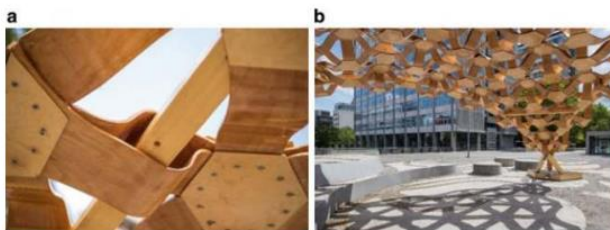
Gambar 6 Proses laminasi **Sebuah** penguatan bio-komposit oleh lapisan veneer 3D dan **b** proses laminasi penguat veneer yang dibantu vakum



Gambar 7 Menggabungkan kaki-kaki untuk membentuk unit-unit bangunan. **Sebuah** Menyisir masing-masing tiga unit kaki dan **b** menggabungkan enam unit kaki ke unit tiga kaki lainnya untuk membentuk struktur cangkang ganda



Gambar 8 Fase konstruksi di luar lokasi dan di tempat **Sebuah** pemesanan segmen di luar lokasi **b** urutan pemasangan segmen yang lebih besar di lokasi



Gambar 9 Detail dalam struktur in **Sebuah** hubungan antara biokomposit dan balok kayu **b** hubungan antara unit biokomposit yang beragam dalam struktur

6. Kesimpulan

Dalam makalah ini, penekanan pada pelapisan dalam meningkatkan sifat inti biokomposit untuk mencapai kapasitas dukung beban untuk konstruksi berkelanjutan di masa depan telah diilustrasikan. Pengembangan inti ekstrusi multi biokomposit dengan serat jerami

berorientasi serat bebas disorot. Itu dimaksudkan untuk mengakhiri kehadiran polimer elastis termoplastik untuk menghasilkan elastisitas, sehingga fleksibilitas dalam mencapai geometri canggih dan bentuk bebas yang saat ini sangat dibutuhkan dalam industri bangunan. Di sisi lain, itu dimaksudkan untuk memperbaiki veneer melalui proses laminasi vakum-dibantu tertutup yang akan memperbaiki geometri akhir yang dibutuhkan dan menghasilkan sifat mekanik yang ditingkatkan yang ditargetkan untuk membangun melalui elemen bangunan inovatif yang dikembangkan aplikasi struktural baru. Ini ditunjukkan melalui paviliun eksperimental yang dibangun di mana nilai target yang sama untuk bahan yang dikembangkan diterapkan dalam analisis struktural. Di dunia fisik, panel sandwich biokomposit lain dikembangkan menggunakan inti elastis ligno-selulosa yang berbeda, tetapi nilai mekanik yang sama diterapkan.



Gambar 10 Pemandangan malam untuk Paviliun biomat 2018

Modulus elastisitas sebanding dengan papan serat kepadatan menengah (MDF) dan target tercapai untuk meningkatkan sifat mekanik dan untuk mengoptimalkan geometri cangkang untuk membuat keuntungan yang tepat dari sifat mekanik yang masih relatif rendah dibandingkan dengan komposit yang diperkuat serat kaca konvensional (GFRP).

Dalam penelitian ini, biokomposit diberi kesempatan lebih lanjut untuk menyelidiki peningkatan sifat mereka untuk bersaing dengan bahan bangunan konvensional

menuju konstruksi yang lebih berkelanjutan di masa depan. Biokomposit memiliki banyak keuntungan, tetapi juga memiliki kelemahan termasuk sensitivitas penyerapan air. Di sisi mekanik, sifat dapat ditingkatkan dengan cara yang berbeda melalui penguatan serat berorientasi seperti yang diilustrasikan dalam makalah ini. Tetapi di sisi lain, pekerjaan penelitian lebih lanjut direkomendasikan untuk lebih jauh ke arah itu dan terutama untuk menemukan cara yang ramah lingkungan untuk meningkatkan ketahanan terhadap pelapukan dari kelompok bahan ini. Ini akan membantu memungkinkan mereka untuk lebih bersaing secara global di pasar bahan bangunan dan dengan demikian mencapai target yang dibutuhkan untuk mencapai persentase alat yang tinggi pada kenyataannya.

Referensi

Blok R, Teuffel PM (25–28 September, 2017) Bio-based composite bridge—lessons learned published. In: Proceedings of the IASS annual symposium 2017 interfaces: architecture, engineering science. Hamburg, Germany.

Dahy H, Knippers J (2016) (PATENT) Flexible high-density fiberboard and method for manufacturing the same. EP3166765A1; Filed 8. July 2014 Published 13 January 2016. Based on Same Patent, Also Applied as WO2016005026A1; CN106604806A; US20170144327, EP2965882 A1

Dahy H (2017a) Biocomposite materials based on annual natural fibres and biopolymers—design, fabrication and

customized applications in architecture. *Constr Build Mater* 147:212–220

Dahy H (2017b) Efficient fabrication of sustainable building products from annually generated nonwood cellulosic fibres and bioplastics with improved flammability resistance. *Waste Biomass Valorizat* No 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0135-3>. Springer Netherlands. Print ISSN 1877–2641, Online ISSN 1877-265X

Dahy H (2019a) Materials as a design tool’ design philosophy applied in three innovative research pavilions out of sustainable building materials with controlled end-of-life scenarios. *Buildings* 9:64

Dahy H (2019b) Natural fibre-reinforced polymer composites (NFRP) fabricated from lignocellulosic fibres for future sustainable architectural applications, case studies: segmented-shell construction, acoustic panels, and furniture. *Sensors* 19(3):738

Dahy H, Petrs J, Bos DH, Baszynski P, Habraken APHW, Teuffel PM (2019a) BioMat Pavilion 2018: development, fabrication and erection of a double curved segmented shell from biocomposite elements. In: Lázaro C, Bletzinger KU, Oñate E (eds), *Proceedings of the IASS annual symposium 2019—structural membranes 2019 form and force*

Dahy H, Petrs J, Baszynski P (2019b) Experimental biocomposite pavilion: segmented shell construction—

design, material development and erection. ACADIA Conference 2019, Texas, USA

Dahy H, Petrs J, Baszynski P (2020) Design and fabrication of two 1:1 architectural demonstrators based on biocomposites from annually renewable resources displaying a future vision for sustainable architecture. FABRICATE 2020, UCL, UK

DIN EN 325:1993 (1993) Wood-based panels; determination of dimensions of test pieces. European Committee for Standardization

BAB 3 KOMPOSIT HIBRIDA PLA

Poli(asam laktat) (PLA) adalah biopolimer sintetik yang paling umum berasal dari sumber daya terbarukan dan biodegradable. PLA digunakan untuk komoditas dan aplikasi khusus seperti implan medis. Suhu pemrosesan rendah, stabilitas mekanik dan termal yang baik dan kemampuan untuk mendapatkan PLA di berbagai konfigurasi dan struktur membuatnya menjadi biopolimer yang ideal. Namun, PLA memiliki beberapa keterbatasan, terutama, ketahanan yang relatif buruk terhadap bahan kimia. Beberapa modifikasi telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja dan sifat PLA dan produk-produknya. Mengembangkan biokomposit dengan memadukan PLA dengan biopolimer lain, bahan nano termasuk nanoclay telah dilakukan. Biokomposit telah dikembangkan dengan memadukan polisakarida seperti selulosa, pati, kitin dan juga protein dengan PLA. Trans-

induk dan biokomposit kinerja tinggi yang berguna untuk makanan, medis dan aplikasi kation lainnya telah dikembangkan dari campuran. Meskipun banyak pendekatan, ada adalah beberapa keterbatasan biokomposit berbasis PLA yang menyajikan ruang lingkup untuk penelitian dan Pengembangan lebih lanjut.

1. Pendahuluan

Poli (asam laktat) adalah salah satu biopolimer sintetik yang paling umum digunakan sively untuk kemasan makanan, farmasi, medis, tekstil dan aplikasi lainnya. Biodegradabilitas, produksi dari sumber daya terbarukan, suhu leleh rendah dan kelarutan dalam pelarut umum adalah beberapa keuntungan menggunakan PLA. Namun, PLA rentan terhadap hidrolisis dalam kondisi basa, relatif lebih banyak rentan terhadap bahan kimia dan produk yang terbuat dari PLA tidak memiliki kinerja yang diinginkan sifat mance. Oleh karena itu, banyak upaya telah dilakukan untuk memodifikasi PLA dan meningkatkan aplikasinya. Studi ekstensif juga telah dilakukan untuk memasukkan biopolimer dan aditif untuk meningkatkan kinerja bahan berbasis PLA. Nanomaterials (serat, partikel, kumis, kapsul dll) telah banyak digunakan untuk meningkatkan

kinerja polimer. Demikian pula, nanoclays juga telah dikenal untuk meningkatkan sifat mekanik, stabilitas termal, kompatibilitas dll. Studi ekstensif telah dilakukan untuk mempelajari kelayakan peningkatan kinerja dan aplikasi bahan PLA melalui penambahan bahan nano. Dalam bab ini, kami memberikan ulasan tentang berbagai bahan nano berbasis selulosa, pati, protein dan tanah liat yang digunakan untuk meningkatkan sifat, pemrosesan, dan aplikasi PLA.

2 PLA Diperkuat dengan Selulosa Nanomaterial

Bahan selulosa telah menjadi penguat atau aditif pilihan untuk PLA untuk meningkatkan sifat tarik, termal, mekanik dan kinerja. Berbagai bahan selulosa termasuk tanaman, pohon, bakteri dll diubah menjadi nanofibrils, nanopartikel dan nanowhiskers untuk penguatan potensial PLA. Karena selulosa sangat stabil dan tidak larut dalam pelarut umum, berbagai pendekatan telah digunakan untuk memproses selulosa dan mendapatkan

bahan nano. Beberapa bahan selulosa umum yang digunakan, teknik yang diadopsi untuk konversi dan metode yang digunakan untuk menggabungkan bahan nano ke dalam PLA diberikan pada Tabel 1 (Kian dkk. 2019).

Film untuk aplikasi pengemasan makanan disiapkan menggunakan campuran PLA, nanopartikel lignin, selulosa mikrokristalin dan umbelliferone (7-hydroxycoumarin), ekstrak tumbuhan alami dengan sifat antioksidan dan antimikroba (Iglesias Montes et al. 2019). Tiga komponen ditambahkan dalam rasio yang diinginkan ke dalam ekstruder sekrup kembar dan diproses menjadi film pada 180-200 °C. Ketebalan film yang terbentuk antara 80 dan 85µm. Selanjutnya, film bilayer dibentuk dengan merakit film monolayer dan pencetakan kompresi pada 155 °C selama 1 menit pada tekanan 25 bar. Menariknya, ketebalan film bilayer lebih rendah dari jumlah ketebalan lapisan individu. Tidak ada

perubahan besar dalam struktur PLA yang diamati karena penambahan selulosa atau lignin dan analisis morfologi menunjukkan interaksi yang baik antara komponen. Meskipun film yang mengandung lebih dari 15% antioksidan cenderung rapuh karena peningkatan ketidakhomogenan, perpanjangan dan kekuatan tertinggi diperoleh pada film yang mengandung nanopartikel dan antioksidan (Tabel 2).

Baik lignin dan umbelliferone berkontribusi pada sifat antioksidan film yang sangat tinggi. Sejak PLA hidrofobik dan hidrofilik mikrokristalin selulosa (MCC) memiliki interaksi yang buruk, modifikasi kimia MCC dilakukan untuk meningkatkan dispersi dan kompatibilitas dengan PLA. Untuk modifikasi, PKS diasetilasi menggunakan asam asetat untuk mendapatkan kandungan asetil hingga 17%. Untuk mendapatkan nanokomposit, PLA dilarutkan dalam kloroform yang ditambahkan MCC yang dimodifikasi dan yang tidak dimodifikasi. Kemudian,

campuran dituangkan ke dalam cetakan Teflon untuk membentuk nanokomposit dengan 0– 17% dari PKS. Asetilasi membantu dalam meningkatkan sifat viskoelastik dan kompatibilitas. Penambahan selulosa termodifikasi dibuat.

Tabel 1 Metode yang digunakan untuk mengubah sumber selulosa menjadi bahan nano dan pendekatan berbeda untuk membuatnya menjadi PLA (Kien et al. 2019). Direproduksi dengan izin dari Elsevier Sumber

Sumber	Perlakuan awal kimia	Perawatan utama	Pasca perawatan	Teknik fabrikasi nanokomposit PLA
serat rami	Perawatan urutan pemutihan elemen bebas klorin (ECF)	Hidrolisis asam klorida	Dialisis, sonikasi, vakum filtrasi	-
kain rami	Natrium hidroksida, natrium karbonat, hidrogen peroksida	Hidrolisis asam sulfat	Pencucian, sentrifugasi, dialisis, ultrasonikasi	-
Kapas industri halus serat batang	Toluena, etanol; natrium klorit, asam asetat; natrium bisulfat	Hidrolisis asam sulfat	sentrifugasi, ultrasonikasi, dialisis	-
Benang ak yang diletakkan	Natrium hidroksida	Hidrolisis asam sulfat	Sentrifugasi, netralisasi (dengan menambahkan NaOH encer)	Pengecoran penguapan PLA dalam pelarut kloroform
serat rami	Natrium hidroksida, natrium klorit, asam asetat	Defibrilasi (mikrofluidizer)	-	-
Serat rami murni	Toluena, etanol; natrium klorit, asam asetat; natrium bisulfat; natrium hidroksida	hidrolisis asam sulfat; modifikasi fisik dengan ester asam fosfat dari ethoxylatednonyphenol surfaktan	Sentrifugasi; dialisis, sonikasi	Pengecoran penguapan campuran PLA / PBS dengan nanoselulosa yang difungsikan dalam pelarut kloroform

(lanjutan)

Tabel 1 (lanjutan)

Sumber	Perlakuan awal kimia	Perawatan utama	Pasca perawatan	Teknik fabrikasi nanokomposit PLA
Serat murni rami	Toluena, etanol; natrium klorit, asam asetat; natrium bisulfat; natrium hidroksida	Hidrolisis asam sulfat	Sentrifugasi, dialisis, sonikasi	-
benang rami	-	Natrium hidroksida, natrium hipoklorit (oksidasi) hidrolisis di bawah agitasi dan sonikasi terus menerus	-	-
serat goni	Natrium hidroksida; natrium klorit, natrium sulfat; hidrogen peroksida	Hidrolisis asam sulfat	Sentrifugasi	-
Kantong goni bekas	Toluena, etanol; Homogenisasi soda memasak (dalam reaktor dasar); hidrogen peroksida; hidrolisis asam klorida (dalam ultrasonikator)	-	-	-
serat goni	Natrium hidroksida; natrium hipoklorit, natrium sulfat	Hidrolisis asam sulfat	Netralisasi (dengan menambahkan NaOH encer), perubahan warna (dengan menambahkan MGOG encer), filtrasi vakum	-

(lanjutan)

Tabel 1 (lanjutan)

Sumber	Perilaku awal kimia	Perawatan utama	Pasca perawatan	Teknik fabrikasi nanokomposit PLA
serat goni	Soda api; natrium klorit	hidrolisis asam oksalat; ledakan uap	Sentrifugasi, agitasi mekanik, sonikasi, netralisasi (dengan menambahkan larutan NaOH)	-
serat goni mumi	Natrium hidroksida, dimetil sulfoksida	Oksidasi yang dimediasi TEMPO.	Sentrifugasi, kecepatan tinggi homogenisasi, ultrasonikasi	-
serat goni	Toluena; natrium hidroksida; hidrogen peroksida	hidrolisis asam sulfat; hidrolisis asam format	Filtrasi (menggunakan membran), netralisasi (dengan memblus dengan air suling)	-
serat goni	Natrium hidroksida, dimetil sulfoksida	Sentrifugasi oksidasi yang dimediasi TEMPO		-
kempa goni	Natrium hidroksida, dimetil sulfoksida	Hidrolisis asam sulfat	Sonikasi, netralisasi (dengan menambahkan NaOH encer), sentrifugasi	-
Serat kenaf yang dilarutkan air	natrium hidr oksida, antrakuin on (dalam digester berputar); tiga tahap pemutihan	Geser mekanis (supermasscolloider); pengaliran	-	-
serat kenaf	Natrium hidroksida; natrium klorit, asam asetat	hidrolisis asam sulfat; homogenisasi hidrolisis asam	Sentrifugasi, dialisis, klorida, penambahan dengan khloroform	-

(lanjutan)

Tabel 1 (lanjutan)

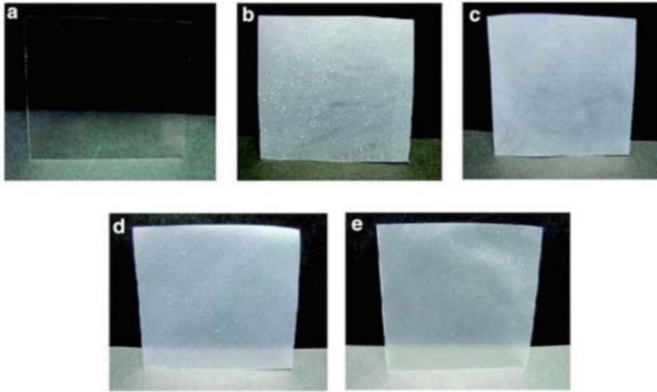
Sumber	Perlakuan awal kimia	Perawatan utama	Pasca perawatan	Teknik fabrikasi nanokomposit PLA
Kayu inti kenaf	Natrium hidroksida; natrium klorit, asam asetat	Hidrolisis asam sulfat	Sentrifugasi, dialisis	-
Serat batang kenaf	Natrium hidroksida	Homogenisasi	-	-
Selulosa mikrokristalin	-	Hidrolisis asam sulfat	Sentrifugasi, dialisis, ultrasonikasi	-
Daging/buah mudele	-	Hidrolisis asam sulfat	sentrifugasi, ultrasonikasi, dialisis	-
Rami serat	Natrium hidroksida	hidrolisis asam sulfat; modifikasi fisik dengan organosilantization	Sentrifugasi, dialisis, homogenisasi, filiasi, netralisasi (dengan menambahkan larutan NaOH)	Bkstrusi lelehan PLA dengan nanoselulosa yang difungsikan tanpa pelarut
Rami serat	Natrium hidroksida	Hidrolisis asam sulfat	Sentrifugasi, dialisis, homogenisasi, filtrasi, adisi dengan kloroform	-

Sampel	Modulus (IPK)	Kekuatan (MPa)	Pemanjangan (%)
PLA rapi	1.4 ± 0.2	41.5 ± 3.9	16.2 ± 4.2
PLA, 3% CNC	1.2 ± 0.1	28.1 ± 4.0	4.9 ± 0.8
PLA, 3% LNP	1.3 ± 0.1	34.2 ± 1.5	8.4 ± 0.9
PLA, 15% UMB	1.2 ± 0,3	28.8 ± 9.3	37.0 ± 4.2
PLA/PLA	1.6 ± 0.2	35.0 ± 6.2	16.4 ± 5.3
PLA/PLA, 3% CNC	1.4 ± 0.1	38.3 ± 2.9	5.6 ± 1.2
PLA/PLA, 3% LNP	1.5 ± 0,3	36.7 ± 4.1	6.3 ± 0.8
PLA/PLA, 15% UMB	1.6 ± 0.1	38.4 ± 2.2	4,5 ± 0.9
PLA 3CNC/PLA 15% UMB	2.1 ± 0.1	52.9 ± 2.2	2.9 ± 0,3
PLA 3LNP/PLA 15% UMB	2.0 ± 0,3	48.4 ± 4.4	3.0 ± 0.2

film tembus cahaya (Gbr. 1), mengurangi hidrofilitas dan meningkatkan stabilitas termal. Selulosa asetat memiliki dispersibilitas yang jauh lebih tinggi dan juga meningkatkan Tg PLA. Peningkatan modulus dan penurunan kekuatan juga diamati dengan 17% selulosa dalam komposit (Tingaut et al.2009). Dalam penelitian

lain, telah ditunjukkan bahwa serat nanoselulosa asetat (panjang $50\mu\text{m}$ dan diameter 50 nm) memberikan afinitas fase yang lebih baik, dispersibilitas dan orientasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan nanoselulosa yang digabungkan dengan silane atau PLA yang tidak dimodifikasi (Ying et al. 2018). Reaksi kopling tidak mempengaruhi modulus serat nano sedangkan asetilasi menurunkan modulus sekitar 10% yang dikaitkan dengan ikatan hidrogen yang kuat antara PLA dan nanoselulosa asetat. Pengamatan morfologi menunjukkan bahwa nanofibers murni memiliki dispersi yang buruk dengan agregat yang terbentuk dari $1\text{-}2\mu\text{m}$ berukuran m. Baik serat yang digabungkan dan diasetilasi memiliki dispersi yang lebih baik berdasarkan pengamatan visual (Gbr. 2).2) dan parameter yang disebut parameter energi interaksi. Serat nano asetat juga memberikan peningkatan sifat tarik biasanya sekitar 38% tetapi kekuatan tarik yang lebih tinggi hingga 51% dimungkinkan tergantung pada jumlah serat nano dalam campuran (Gbr. 2).3).

Nanocrystals selulosa yang diekstraksi dari ampas tebu dikombinasikan dengan PLA untuk mengembangkan komposit dengan stabilitas termal yang lebih baik (Gan dan Wen 2019). Bagasse di-delignifikasi dan kemudian dihidrolisis asam dengan asam sulfat 6 M dan asam fosfat 11 M pada 55 ° C selama 30 menit. Nanokristal selulosa yang terbentuk diperoleh setelah dialisis dan pengeringan beku. Untuk membentuk komposit, nanoselulosa dan PLA dilarutkan dalam kloroform untuk mendapatkan konsentrasi CNC 10% dan larutan dicetak ke dalam bentuk film. Nanocrystals selulosa memiliki diameter antara 5,5 dan 6,2 nm.

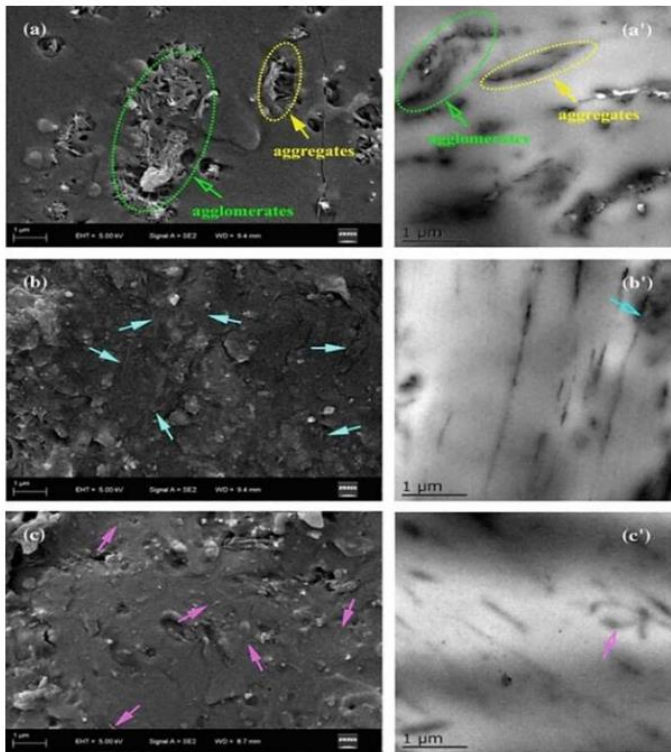


Gambar 1 Perubahan tampilan (transparansi) PLA rapi (**Sebuah**) film diperkuat dengan selulosa mikrokrystalin asetat. **b** (0%), **c** (3,5%), **d** (8,5%) dan **e** (17%) film yang diperkuat nanoselulosa (Tingaut et al. 2009). Direproduksi dengan izin dari American Chemical Society

Panjang 235–300 nm dengan rasio aspek antara 37–55. Namun, aglomerasi CNC juga diperhatikan karena ikatan hidrogen antarmolekul. Studi XPS dan FTIR mengkonfirmasi penambahan gugus sulfat dan fosfat pada permukaan selulosa karena perlakuan asam. Komposit yang mengandung nanoselulosa yang diolah dengan asam fosfat memberikan stabilitas termal yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan selulosa yang diolah dengan asam fosfat (Gan andWen2019). Dalam

pendekatan terkait, nanofibers selulosa kristalin tinggi dimodifikasi untuk menambahkan kepadatan tinggi gugus karboksilat dan kemudian dicangkokkan ke PLA dan dibuat menjadi komposit. Pulp selulosa yang diperoleh dari kayu lunak utara dan ampas tebu (bukan kayu) diperlakukan dengan 2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl (TEMPO) dan oksidasi permukaan dilakukan untuk mendapatkan selulosa yang diolah (Gbr. 1).4). Pertukaran ion dengan litium klorida dilakukan untuk menghasilkan nanofiber selulosa teroksidasi TEMPO. Serat nano selulosa yang dimodifikasi dicangkokkan ke PLA melalui polimerisasi cincin terbuka. Tingkat pencangkokan dan rasio molar gugus karboksilat pada PLA dikendalikan dengan memvariasikan kondisi reaksi. Kandungan karboksilat bahan meningkat secara signifikan setelah perlakuan dengan TEMPO dan selanjutnya setelah oksidasi. Kandungan karboksilat 1,03 mmol/g diperoleh untuk selulosa teroksidasi dibandingkan dengan 0,03mmol/g

untuk ampas tebu yang tidak diolah. Namun, kristalinitas dan ukuran kristal dari selulosa termodifikasi lebih rendah dibandingkan dengan pulp selulosa yang tidak dimodifikasi tetapi lebih tinggi daripada kristalinitas PLA yang rapi.2019a; b). Proses yang ditingkatkan dan konversi gugus karboksilat yang lebih tinggi bersama dengan kristalinitas selulosa yang lebih tinggi.

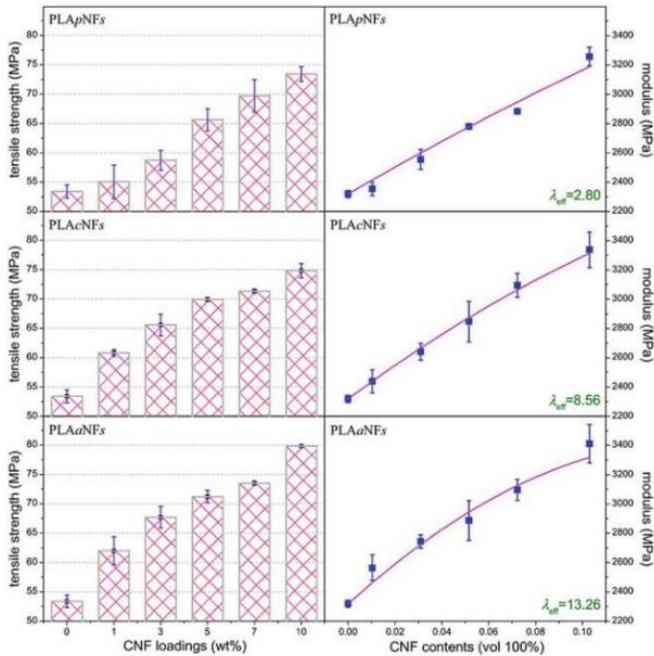


Gambar 2. Gambar SEM (kiri) dan TEM (kanan) dari PLA dan PLAfilm yang rapi (serat yang tidak diolah) yang mengandung **b** dan asetat **c** serat nanoselulosa menunjukkan perbedaan dalam dispersi dan kompatibilitas (Ying et al. 2018). Direproduksi dengan izin dari Springer Nature

diperoleh ketika polimerisasi cincin terbuka dilakukan dengan menggunakan lipase sebagai katalis. Kandungan gugus karboksilat 1,63-1,68 mmol/g diperoleh dan PLA

dalam komposit yang dikembangkan memiliki kristalinitas 76% dan ukuran kristal 3,8 nm. Dispersi yang lebih baik dari selulosa termodifikasi dan stabilitas termal yang lebih tinggi dari komposit juga dimungkinkan dengan menggunakan katalis dan polimerisasi cincin terbuka (Chuensangjun et al. 2019a; b).

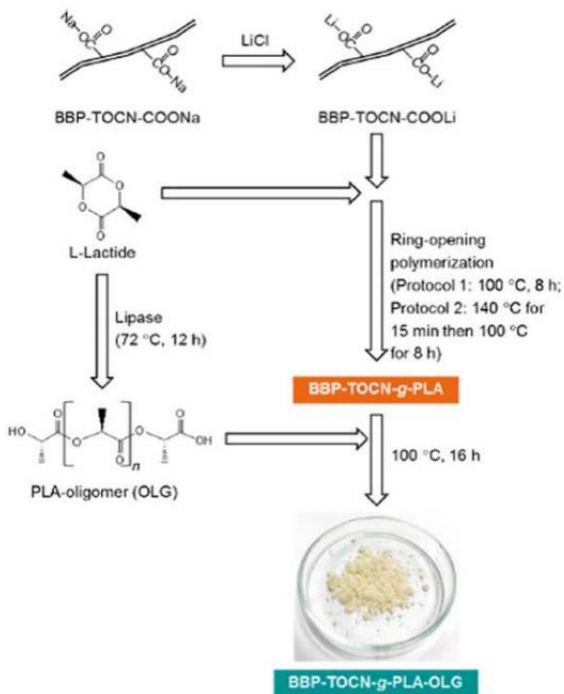
Grafting nanocrystals selulosa ke PLA juga dilakukan dengan menggunakan pendekatan polimerisasi pembukaan cincin in-situ dari L-laktida. Nanokristal selulosa dibuat dari pulp kayu lunak dengan lebar 13 nm dan panjang 140 nm.



Gambar 3 Kekuatan tarik dan modulus film PLA dengan serat nanoselulosa yang tidak diolah (PLApNFs) dan yang mengandung serat nanoselulosa setelah kopling (PLAcNFs) dan asetilasi (PLAaNFs) (Ying et al. 2018). Direproduksi dengan izin dari Springer Nature

L-laktida dilarutkan dalam DMSO dengan adanya inisiator dan katalis. Reaksi polimerisasi dilakukan selama 17 jam di bawah atmosfer nitrogen. Tergantung pada kondisi reaksi, rasio pencangkakan 84-152% diperoleh (Miao dan Hamad2016). PLA yang mengandung

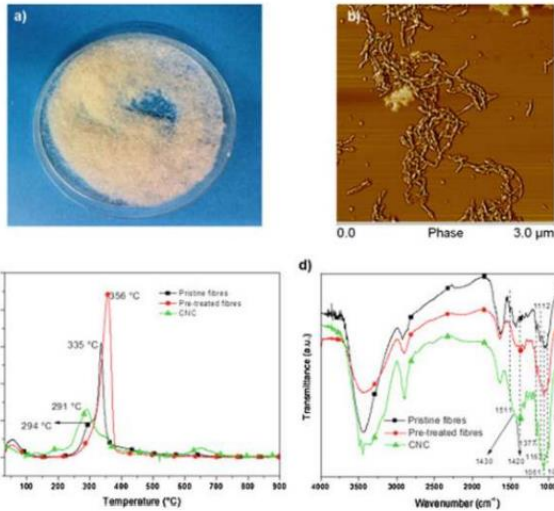
nanocrystals terpolimerisasi dibuat menjadi film menggunakan pengecoran larutan dan juga co-ekstrusi. Nanomaterial yang dicangkokkan memiliki dispersibilitas yang lebih baik dalam kloroform dibandingkan dengan PLA yang tidak dimodifikasi. Penurunan yang cukup besar dalam sudut kontak air tetapi tidak ada perubahan besar dalam perilaku termal yang diamati karena pencangkokan nanocrystals. Namun, permeabilitas oksigen dan uap air telah menurun sehingga meningkatkan sifat penghalang. Tingkat permeabilitas uap air antara 2244 dan 3137 (ml.mm)/(Cm².s.cHg) dan tingkat transmisi oksigen yang serupa atau lebih baik daripada anggota PET, PE dan selulosa asetat yang digunakan secara komersial dicapai membuat film nanokristal PLA-selulosa cocok.



Gambar 4 Skema proses pembuatan komposit PLA yang dicangkok dengan serat nano selulosa yang diperoleh dari ampas tebu yang dimodifikasi menggunakan TEMPO (Chuensangjun et al. 2019a; b). Oksidasi dilakukan dengan menggunakan lipase sebagai katalis untuk mendapatkan gugus karboksilat dan kristalinitas yang lebih tinggi

untuk aplikasi kemasan makanan. Demikian pula, hingga 1100% peningkatan modulus dimungkinkan karena nanocrystals berfungsi sebagai agen nukleasi yang sangat baik (Miao dan Hamad2016).

Sebuah alga *Posidonia oceanika* telah digunakan sebagai sumber serat selulosa dan nanopartikel selulosa untuk memperkuat PLA. Alga diputihkan secara ekstensif untuk mendapatkan serat dan serat ini diubah menjadi nanopartikel selulosa dengan hidrolisis asam dengan hasil 14%. Nanopartikel juga dimodifikasi dengan surfaktan untuk meningkatkan dispersi dan kompatibilitas ketika digunakan sebagai penguat dalam film nanokomposit PLA. PLA dilarutkan dalam kloroform di mana nanoselulosa yang diolah dan tidak diolah ditambahkan dan larutan dibuat menjadi 50 μ m.



Gambar 5 Gambar digital **Sebuah**; struktur AFM **b**, perilaku termal **c** dan struktur kimia **d** dari bahan selulosa yang dibuat dari *Posidonia oceanika* (Fortunati dkk. 2015). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

film dengan pengecoran solusi (Fortunati et al. 2015). Nanocrystals yang diperoleh memiliki panjang 180 nm dan diameter 4,9 nm dan memiliki struktur selulosa I yang khas (Gbr. 2).5). Hidrolisis asam mengurangi stabilitas termal nanoselulosa tetapi tidak mempengaruhi transparansi film PLA. Penambahan nanocrystals ke dalam PLA meningkatkan porositas tetapi mengurangi kerapuhan pada konsentrasi 3% dan

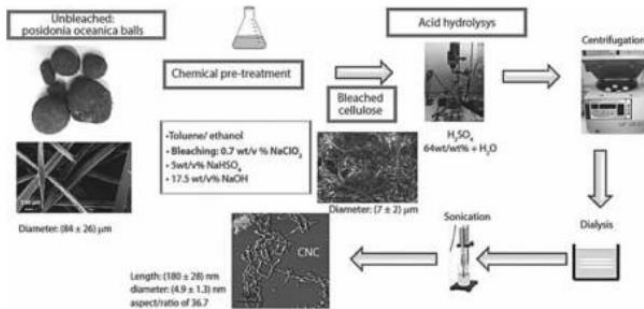
setelah dimodifikasi dengan deterjen. Juga, kristalisasi yang lebih baik diamati pada film PLA yang mengandung nanoselulosa. Peningkatan yang cukup besar dalam sifat mekanik PLA terutama ketika diperkuat dengan nanoselulosa termodifikasi surfaktan diamati (Tabel 3).

Nanopartikel seng oksida digunakan sebagai tambahan nanokristal selulosa dari *Posidonia oceanika* untuk lebih meningkatkan sifat PLA untuk aplikasi kemasan makanan. Nanocrystals selulosa (panjang 180 nm dan diameter 4,9 nm) diekstraksi dari *Posidonia oceanika* dan nanopartikel seng oksida ditambahkan ke PLA (Luzi et al. 2017). Nanocrystals dimodifikasi dengan memperlakukan dengan ester fosfat dari etoksilasinonil fenol dan surfaktan. PLA dan nanoselulosa yang dimodifikasi dilarutkan dalam kloroform secara terpisah dan kemudian digabungkan bersamasama (Gbr. 2).6). Nanopartikel ZnO juga didispersikan dalam kloroform dan digabungkan dengan PLA untuk membentuk

campuran biner dan kemudian digabungkan dengan selulosa dan larutan PLA untuk membentuk senyawa tersier.

Tabel 3 Pengaruh unmodified (CNC) dan surfaktan dimodifikasi selulosa nanocrystals (SCNC) pada sifat mekanik film PLA (Fortunati et Al. 2015). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

Komposisi	Kekuatan hasil (MPa)	Perpanjangan pada hasil (%)	Pemecahan kekuatan (MPa)	Pemecahan pemanjangan (%)	muda modulus (MPa)
PLA rapi	14.7 ± 5.1	2.3 ± 0,5	16,5 ± 3.1	278 ± 34	1205 ± 100
PLA, 1% CNC	31,3 ± 1.6	3.0 ± 0,5	27.1 ± 6.3	200 ± 53	1330 ± 90
PLA, 1% SCNC	22,9 ± 4.2	2.6 ± 0.6	22.9 ± 1.2	286 ± 25	993 ± 190
PLA, 3% CNC	42.1 ± 2.0	2.7 ± 0.6	21.9 ± 3.5	101 ± 28	1930 ± 170
PLA 3% SCNC	25,7 ± 4.8	3.1 ± 0.1	20.2 ± 1.9	210 ± 48	800 ± 100



Gambar 6 Skema persiapan nanocrystals selulosa untuk memperkuat dengan PLA (Luzi et al. 2017). Direproduksi dengan izin melalui lisensi Creative Commons CC

campuran (Luzi et al. 2017). Serat diperoleh setelah pengecoran solusi dan pengeringan di bawah kondisi

yang sesuai. Penambahan bahan nano ke dalam PLA secara terpisah tidak mempengaruhi morfologi nanokomposit sedangkan struktur yang lebih kompak terbentuk dalam kasus campuran tersier. Kekuatan tarik dan pemanjangan film PLA meningkat karena penambahan nanopartikel sedangkan permeabilitas uap air menurun yang lebih disukai untuk aplikasi pengemasan makanan (Tabel 4). Tidak ada efek utama ZnO pada aktivitas antimikroba dari film.

Kombinasi nanofiller anorganik dan serat selulosa digunakan untuk memperkuat PLA dan mendapatkan komposit dengan sifat yang lebih baik (Piekarska et al. 2016). PLA yang digunakan memiliki densitas 1,24 g/cm³ dengan kandungan d dan l-laktida masing-masing 2,5 dan 97,5%. Kalsium karbonat (80 nm) (NCC), Closite 30B (MMT), dan serat nano selulosa (CF) digunakan secara individual dan juga dalam kombinasi untuk memperkuat

Tabel 4 Sifat mekanik dan permeabilitas uap air PLA yang diperkuat dengan ZnO dan/atau nanokristal selulosa (Luzi et al. 2017). Direproduksi dengan izin melalui Creative Commons lisensi CC CC

Sampel	Kekuatan (MPa)	Pemanjangan (%)	Modulus (MPa)	Permeabilitas uap air g mm/kPa hmz	
				11-53% RH	100-53% RH
PLA	16,5 ± 3.1	277 ± 33	1205 ± 100	0,051 ± 0,004	0,067 ± 0,006
PLA 1s-CNC	22.9 ± 1.2	286 ± 25	993 ± 190	0,047 ± 0,002	0,063 ± 0,002
PLA 0.1 ZnO	20.5 ± 2.0	105 ± 10	1163 ± 33	0,048 ± 0,005	0,063 ± 0,007
PLA 0.5 ZnO	38.3 ± 3.6	87 ± 8	1210 ± 50	0,046 ± 0,003	0,058 ± 0,002
PLA 1s-CNC 0,1 ZnO	21.7 ± 1.6	250 ± 45	975 ± 60	0,044 ± 0,001	0,056 ± 0,001
PLA 1s-CNC 0,5 ZnO	23.7 ± 0.8	205 ± 15	990 ± 40	0,041 ± 0,002	0,052 ± 0,005

PLA. real dan ketebalan Campuran PLA dengan NCC dan MMT dibuat dengan meleleh mencampur pasangankemudian menggabungkan dengan CF, ketika film hibrida dikembangkan. Film 1 dan 0,5 mm diekstrusi yang kemudian dicetak dengan kompresi menjadi sampel yang ditunjuk pada 180 ° C selama 3 menit. Partikel lempung memiliki dispersibilitas yang baik dan tidak menunjukkan aglomerasi dan penambahan CF mendukung dispersi lebih lanjut. Namun, stabilitas

termal dari film PLA/MMT/CF hibrida lebih rendah dari PLA/MMT tetapi lebih baik dari PLA/CF. Sifat tarik PLA meningkat dengan penambahan MMT atau NCC tetapi peningkatan lebih ditingkatkan ketika CF dimasukkan ke dalam MMT dan NCC (Tabel 5).

Surfaktan berbasis PLLA dikembangkan dan digunakan sebagai matriks dengan nanokristal selulosa yang diekstraksi dari serat rami (Mariano et al. 2017). Nanoselulosa yang diperoleh memiliki panjang rata-rata 200 nm, lebar 7 nm dan % kristalinitas 85%. Surfaktan berbasis PLA (PEG-b-PLLA) dan Im-PLLA dibuat dari L-laktida dan bahan kimia lainnya melalui polimerisasi pembukaan cincin. Surfaktan yang disiapkan digabungkan dengan CNC dan larutan cor untuk membentuk film pada pelat kaca. Film yang terbentuk digabungkan dengan PLA dan diekstrusi dalam pengestrusi ulir kembar pada tekanan 170 °C dan 200bar untuk membentuk sampel komposit.

Penambahan surfaktan PEG-b-PLLA meningkatkan transmitansi sedangkan Im-PLLA menurunkan transmitansi seperti yang ditunjukkan pada Gambar.7. Stabilitas termal film juga meningkat karena penambahan Im-PLLA yang diduga karena interaksi ionik yang lebih baik antara polimer dan nanokristal selulosa. Namun, juga didalilkan bahwa surfaktan dapat menyebabkan penurunan berat molekul dan pemendekan rantai PLA yang mengarah pada efek plastisasi dan mengurangi kristalinitas matriks (Mariano et al. 2017).

Tabel 5 Sifat film PLA diperkuat dengan MMT, NCC, CF dan hibridanya (Piekarska dkk. 2016). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

Sampel	Suhu (°C)	Tegangan hasil (MPa)	Tegangan putus Perpanjangan (MPa) (%)	Penyimpanan modulus (MPa)	
PLA	25	49.3 ± 0.1	47.3 ± 0.1	29.0 ± 3.8	3011 ± 43
PLA/CF	25	-	44.8 ± 1.2	7.1 ± 0,3	3500 ± 8
PLA/NCC	25	44.1 ± 2.4	42.2 ± 2.2	31.7 ± 0,7	3296 ± 4
PLA/NCC/CF	25	-	41.5 ± 0.1	5.8 ± 0,5	4340 ± 45
PLA/MMT	25	49.9 ± 1.6	45.1 ± 0,7	7.8 ± 0.6	3600 ± 63
PLA/MMT/CF	25	-	42.1 ± 2.1	5.1 ± 0,3	4578 ± 34
PLA	35	47,5 ± 0,5	42,8 ± 0,7	37,4 ± 6,4	2938 ± 43
PLA/CF	35	33,4 ± 3,0	32,5 ± 1,4	6,2 ± 0,1	3410 ± 8
PLA/NCC	35	43,0 ± 0,7	32,7 ± 1,8	47,4 ± 4,0	3216 ± 2
PLA/NCC/CF	35	35,8 ± 2,9	29,8 ± 1,0	6,2 ± 0,1	4224 ± 46
PLA/MMT	35	43,8 ± 0,6	37,2 ± 0,2	9,4 ± 1,3	3515 ± 47
PLA/MMT/CF	35	28,7 ± 4,0	27,6 ± 4,1	4,4 ± 0,3	4444 ± 58

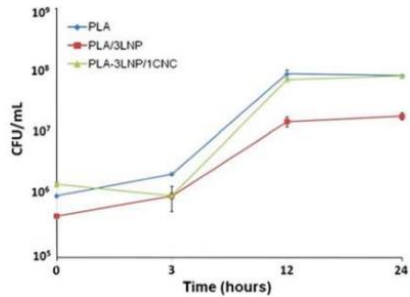


Gambar 7 Pengaruh penambahan berbagai tingkat surfaktan yang dimodifikasi ke PLA dan injeksi yang dicetak ke dalam cakram **Sebuah** dan gambar komposit PLA yang tidak dimodifikasi (Mariano et al. 2017). Direproduksi dengan izin dari American Chemical Society melalui penerbitan akses terbuka

Campuran alternatif selulosa mikrokristalin, selulosa nanokristal dan nanolignin digabungkan dengan PLA yang tidak dimodifikasi dan dimodifikasi untuk mengembangkan film dengan sifat antimikroba untuk aplikasi pengemasan makanan (Yang et al. 2016).

Kombinasi yang berbeda dari tiga polimer digunakan untuk mengembangkan film dengan berbagai sifat. Film yang mengandung 3% nanoselulosa memiliki transparansi yang baik terhadap sinar UV tetapi keberadaan lignin dalam film menyebabkan pemblokiran sinar UV. Perubahan juga diamati dalam perilaku termal dan kristal yang menyebabkan PLA yang dicangkokkan memberikan kompatibilitas yang lebih baik dan karenanya meningkatkan kristalisasi dan ketahanan termal. Suhu kristalisasi terendah 96 °C dimungkinkan karena adanya nanopartikel selulosa dan lignin. Penambahan selulosa menyebabkan peningkatan sifat tarik yang lebih besar dibandingkan dengan nanopartikel lignin. Film PLA murni rentan terhadap mikroba sedangkan penambahan 3% lignin memberikan ketahanan yang tinggi dan bahkan 1% selulosa dalam campuran terner.

Gambar 8 Kemampuan nanopartikel PLA dan selulosa dan nanopartikel lignin mengandung film campuran untuk menahan pertumbuhan *Pseudomonas aeruginosa* (*Pst*) setelah inkubasi hingga 24 jam (Yang et al. 2016). Direproduksi dengan izin dari Elsevier



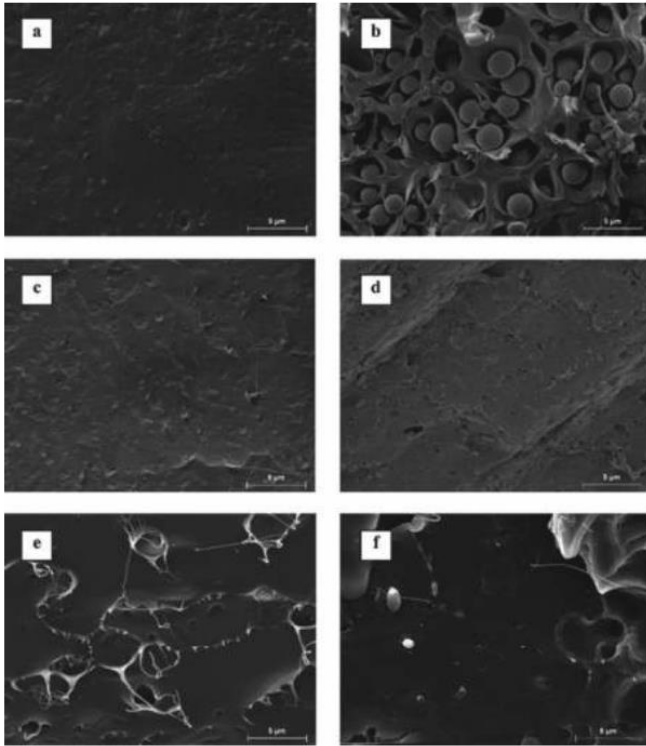
menyebabkan penurunan marginal (Gbr. 8). Disarankan bahwa film terner dapat digunakan untuk mendeteksi patogen dalam makanan saat digunakan sebagai kemasan (Yang et al. 2016). Nanowhisker yang diekstraksi dari serat tandan kosong kelapa sawit digunakan untuk meningkatkan sifat film PLA (Haafiz et al. 2016). Nanowhisker selulosa (dengan panjang sekitar 100 nm dan lebar sekitar 10 nm) diekstraksi menggunakan pendekatan hidrolisis asam. Modifikasi kimia dilakukan pada kumis untuk memperbaiki pembengkakan. Kumis nanoselulosa yang dimodifikasi ditambahkan ke dalam PLA yang dilarutkan dalam

kloroform dalam 1, 3 atau 5% berat dan dicetak ke dalam film. Gambar mikroskop gaya atom (AFM) mengkonfirmasi dimensi skala nano tetapi mengungkapkan bahwa selulosa dalam bentuk bola sebelum hidrolisis tetapi diubah menjadi batang seperti kumis setelah hidrolisis. Distribusi seragam dan interaksi yang baik tetapi adhesi antarmuka yang buruk diamati antara nanowhiskers dan PLA hingga kandungan serat 3%. Tingkat penguatan yang lebih tinggi menyebabkan aglomerasi dan juga pengurangan sifat. Karena perubahan-perubahan tersebut, kekuatan dan modulus film meningkat tetapi elongasi menurun dengan meningkatnya kadar nanoselulosa dalam film. Namun, perilaku termal film PLA ditemukan membaik setelah penambahan nanoselulosa (Haafiz et al. 2016).

3 PLA Diperkuat dengan Nanofibers dari Bakteri

Mirip dengan sumber tanaman, nanofibrils diperoleh dari selulosa bakteri juga telah dipelajari untuk potensi peningkatan kinerja film PLA (Martinez-Sanz et al. 2012). Selulosa bakteri dibuat dari strain *Glukonasetobakteri xylinus* 7351 dan digunakan untuk meningkatkan sifat PLA yang memiliki berat molekul 150.000 gram/mol. Selulosa yang dikembangkan diperlakukan dengan asam sulfat pada 50 °C selama tiga hari untuk membentuk nanowhisiker dengan hasil sekitar 79%. PLA dan nanowhisiker selulosa bakteri dilarutkan menggunakan HFIP dan electrospun menjadi serat menggunakan tegangan 10-12 kV dan kecepatan ekstrusi 0,66mL/jam. Nanokomposit adalah dikembangkan dari selulosa menggunakan tiga pendekatan berbeda: electrospinning, solution casting dan injection molding. Film yang dikembangkan menggunakan electrospun nanowhisiker menunjukkan pengurangan transparansi

yang lebih rendah dan distribusi yang lebih homogen. Perbedaan yang cukup besar dalam morfologi fraktur diamati karena perbedaan kompatibilitas (Gbr. 2).9). Pencairan dan transisi gelas tidak terpengaruh karena penambahan nanoselulosa. Namun, entalpi leleh dan kristalisasi dingin.



Gambar 9 Gambar SEM dari PLA murni **Sebuah** Film PLA dibuat menggunakan 16% EVOH **b**, 1% selulosa bakteri yang mengandung film yang dibuat menggunakan electrospinning **c**, 2% selulosa bakteri yang mengandung film yang dibuat menggunakan electrospinning **d**, 2% selulosa beku kering **e**, 2% selulosa bakteri dibuat menggunakan ekstrusi, **f** (Martínez-Sanz dkk. 2012). Direproduksi dengan izin dari American Chemical Society

Table 6 Thermal behavior of PLA and PLA nanocomposites containing bacterial cellulose incorporated into PLA using various techniques. Melting enthalpy (ΔH_m), cold crystallization temperature (T_{cc}), cold crystallization enthalpy (ΔH_{cc}), PLA crystallinity (X_c), and glass transition temperature (T_g) (Martínez-Sanz et al. 2012). Reproduced with permission from American Chemical Society

Samples	T_m (°C)	ΔH_m (J/g) PLA	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g) PLA	X_c (%)	T_{g1} (°C)	T_{g2} (°C)
PLA	150.8 ± 2.5	26 ± 0.7	119 ± 1.8	12 ± 0.5	16 ± 0.3	60 ± 1.8	60 ± 1.1
1% ES	151.6 ± 1.5	22 ± 0.5	105 ± 0.9	4.3 ± 3.7	19 ± 4.6	59 ± 0.0	59 ± 0.3
2% ES	148.5 ± 2.0	25 ± 1.1	110 ± 1.4	13 ± 0.9	13 ± 0.2	58 ± 0.5	59 ± 0.8
3% ES	150.3 ± 3.2	18 ± 0.6	109 ± 1.9	2.6 ± 1.6	17 ± 1.1	59 ± 0.6	59 ± 0.3
1% FD	150.9 ± 2.1	24 ± 0.8	119 ± 1.6	9.4 ± 0.6	16 ± 1.1	58 ± 1.3	59 ± 1.0
2% FD	150.2 ± 0.7	24 ± 2.9	120 ± 3.3	9.3 ± 0.4	16 ± 2.6	57 ± 2.3	59 ± 0.1
PLA, 16% EVOH	151.3 ± 1.5	22 ± 1.0	123 ± 1.7	8.1 ± 1.9	15 ± 1.0	56 ± 0.5	59 ± 0.5
1% P	151.0 ± 2.4	27 ± 0.4	121 ± 2.1	11 ± 0.4	18 ± 0.8	59 ± 1.3	59 ± 1.3
2% P	149.8 ± 0.1	26 ± 0.1	120 ± 1.2	7.6 ± 3.7	19 ± 3.9	59 ± 1.2	59 ± 0.3

suhu dipengaruhi oleh metode yang diadopsi untuk menambahkan nanowhisker selulosa ke dalam PLA (Tabel 6).

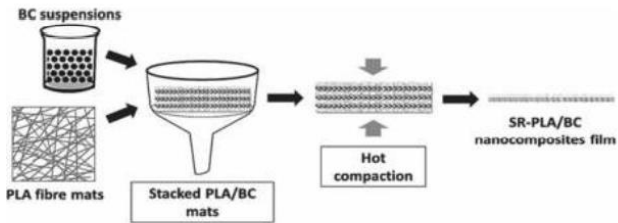
Sekitar 17% peningkatan modulus elastisitas dan 14% dalam kekuatan tarik diperoleh ketika 2-3% nanowhisker digabungkan. Permeabilitas uap air menurun sebesar 43% pada pemuatan serat 3% sedangkan peningkatan yang signifikan dalam sifat penghalang oksigen diperhatikan bahkan ketika pemuatan serat nano adalah 1%. Nanoselulosa bakteri, terutama setelah

electrospinning ditemukan ideal untuk meningkatkan penghalang dan sifat mekanik yang diperlukan untuk kemasan makanan dan aplikasi lainnya (MartínezSanz et al.2012). Pelikel selulosa bakteri dibuat dengan disintegrasi mekanis yang memiliki lebar sekitar 150 nm dan struktur seperti pita ditambahkan ke dalam PLA cair (berat molekul antara 195.000 dan 205,00 Da dan densitas 1,24 g/cm³) dan diekstrusi dalam bentuk lembaran dengan ketebalan sekitar 0,5 mm. Tidak ada perubahan yang diamati pada suhu degradasi PLA tetapi transisi gelas dan kristalisasi dingin ditemukan meningkat karena penambahan selulosa bakteri. Kemampuan selulosa bakteri untuk bertindak sebagai agen nukleasi dan bahkan dispersi dalam matriks diduga menjadi alasan perubahan perilaku termal. Interaksi antar muka yang baik menyebabkan penurunan mobilitas segmental menyebabkan peningkatan modulus. Sekitar 15% peningkatan kekuatan dan 10% peningkatan modulus

tarik dimungkinkan bahkan dengan penambahan 5% serat nano (Panaitescu et.al.2017).

Diamati bahwa lembaran cetakan kompresi dari serat PLA elektrospun pada suhu dan waktu tertentu mengarah pada pembentukan film transparan dengan peningkatan substansial dalam ketangguhan (Somord et al. 2018). Memanfaatkan fenomena penguatan diri ini, nanokomposit PLA dengan sifat kinerja yang ditingkatkan disiapkan dengan menambahkan selulosa bakteri yang dimodifikasi dan tidak dimodifikasi (Somord et al.2018). Selulosa bakteri dibudidayakan dari *Gluconacetobacter xylinus* regangan TISTR 975 dan diperoleh berupa pelikel dengan ketebalan 1 cm. Pelikel ini dihomogenkan dan dipertahankan sebagai suspensi dalam air. Selulosa bakteri juga diperlakukan dengan 3- (trimethoxysilyl) propyl methacrylate untuk meningkatkan adhesi dan kompatibilitas dengan PLA. Tikar PLA Electrospun ditempatkan dalam filter dan BC atau suspensi BC (MBC)

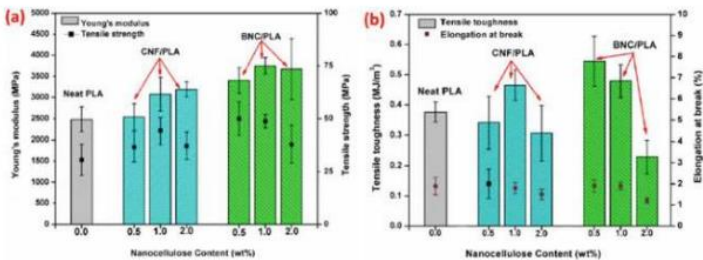
yang dimodifikasi (1 atau 10%) dituangkan ke tikar. Tikar PLA tambahan ditumpuk dan BC ditambahkan ke PLA seperti yang ditunjukkan pada Gambar.10. Setelah lapisan PLA dan BC yang diinginkan ditambahkan, struktur multilayer diperlakukan dengan etanol, dibilas dalam air dan dikeringkan pada 50 ° C selama 150 menit. Potongan persegi panjang 3 cm×3 cm×150µm yang dipotong dari membran PLABC diperlakukan dan ditempatkan dalam cetakan dan kompresi dicetak untuk membentuk film. Film tanpa dan yang mengandung 1% selulosa transparan tetapi transparansi menurun dengan meningkatnya kandungan selulosa bakteri. Penambahan BC menyebabkan peningkatan sifat tarik karena efek penguat yang lebih jelas ketika MBC digunakan (Tabel7). Ketahanan termal meningkat dan permeabilitas uap air menurun setelah penambahan selulosa bakteri (Somord et al.2018).



Gambar 10 Skema proses konversi nanokomposit PLA yang diperkuat selulosa bakteri melalui teknik penguatan sendiri (Somord et al. 2018). Direproduksi dengan izin melalui Creative Commons Attribution License

Table 7 Sifat tarik membran electrospun PLA yang rapi, PLA yang diperkuat sendiri dan yang diperkuat dengan 1 atau 10% BC atau MBC (Somord et al. 2018). Direproduksi dengan izin melalui Lisensi Atribusi Creative Commons

Sampel	Kekuatan (MPa)	Modulus (GPa)	Perpanjangan (%)	Ketangguhan (MJ/m ³)
PLA	49,9 ± 3,0	2,8 ± 0,1	5,2 ± 2,4	2,2 ± 1,0
SR-PLA rapi	61,2 ± 2,0	2,2 ± 0,3	15,6 ± 8,9	8,5 ± 5,0
SR-PLA-1% SM	70,1 ± 2,0	3,0 ± 0,2	0,2 ± 1,2	3,6 ± 0,9
SR-PLA-1%MBC	79,5 ± 4,9	3,1 ± 0,3	46,8 ± 6,2	35,0 ± 4,4
SR-PLA-10% SM	79,6 ± 1,8	3,5 ± 0,1	3,1 ± 0,3	1,7 ± 0,3
SR-PLA-10%MBC	87,5 ± 3,5	3,8 ± 0,1	2,8 ± 0,2	1,9 ± 0,5



Gambar 11 Sifat tarik film PLA yang diperkuat dengan selulosa nanofibrils (CNC) dan nanoselulosa bakteri (BNC) dengan meningkatnya kandungan serat nano (Gitari et al. 2019)

Dalam studi banding, ditemukan bahwa nanoselulosa bakterial mampu memberikan sifat mekanik yang lebih baik daripada nanofibril selulosa yang diperoleh dari kayu lunak (Gitari et al. 2019). Dilaporkan bahwa selama ekstraksi serat nano dari bakteri, pembentukan karbonat terjadi yang mengurangi ikatan antara nanoselulosa dan meningkatkan dispersi dalam matriks PLA. Baik serat nano dan nanoselulosa menurunkan transisi gelas sedangkan serat nano meningkat dan nanoselulosa menurunkan suhu kristalisasi dingin. Dari segi sifat mekanik, terjadi peningkatan modulus Young dari sekitar 2500 menjadi 3672 MPa. Demikian pula, kekuatan komposit yang mengandung nanoselulosa bakteri meningkat menjadi 50 MPa, lebih tinggi dari serat selulosa (Gbr. 2).11). Perpanjangan dan ketangguhan film menurun karena penambahan bahan nano (Gitari et al.2019).

4 Komposit PLA Diperkuat dengan Kitin Nano

Selain selulosa, polisakarida lain terutama pati dan kitin/kitosan juga telah digunakan sebagai penguat untuk mengembangkan nanokomposit PLA. Ringkasan dari berbagai upaya yang dilakukan untuk menggunakan kitin dan pati dalam nanokomposit PLA diberikan pada Tabel 8.

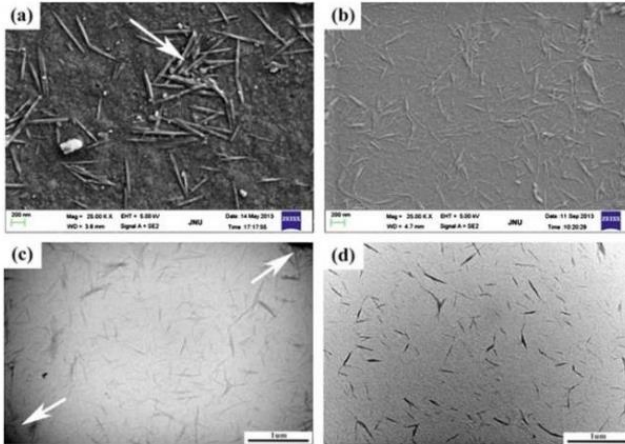
Tabel 8 Jenis kitin/pati yang digunakan sebagai penguat untuk pengembangan nanokomposit PLA dan sifat yang dihasilkan (Scaffaro et al. 2017). Direproduksi dengan izin dari Springer Nature

Kandungan (berat%)	Pengisi modifikasi	Komponen lainnya	Persiapan metode	Hasil utama
ChNC naik sampai 10%	Asetilasi	-	Pengecoran pelarut	E = +37%, TS = + 45%
ChNC 1%	-	TEC	Ekstrusi	E = +67%, TS = + 28%
ChNC 1%	-	gliserol triasetat, polibutilena adipat-co-tereftalat, bedak	Film bertiuip	E = +75%, TS = + 65%
ChNC naik sampai 5%	-	PHBV, DMAC	BERSAMA; berbusa	TS = +133%
ChNC naik sampai 10%	l-laktida	-	Pengecoran pelarut	E = +133%, TS = +63%
ChNC naik sampai 10%	l-laktida	-	Elektrospinning	E = +143%, TS = +49%
ChNC naik sampai 5%	l-laktida	MgO	Injeksi cetakan	E = + 18%, TS = + 33%
SNC 3,2%	PLA	-	Okulasi reaksi	Berhasil pencangkakan PLA ke SNC
SNC naik sampai 8%	Tautan silang	-	Pengecoran pelarut	E = +35%, TS = + 12%
SNC naik sampai 30%	PCL	-	Pengecoran pelarut	TS = +132%, Eb = +400%
SNC naik menjadi 2%	Dimediasi ozon - pencangkakan stirena	-	Pengecoran pelarut	WVP hingga - 52%, DTGpuncak hingga +130 °C

dalam ekstruder ulir kembar dan dibuat menjadi spesimen dengan pencetakan injeksi pada 180 °C, tekanan 650 bar, waktu tahan 15 detik dan suhu cetakan 135 °C. Penambahan PEG meningkatkan kompatibilitas antara kitin dan PLA yang mengarah pada peningkatan

ketahanan termal. Meskipun tidak ada perbaikan besar dalam kekuatan tarik atau modulus yang diamati, perpanjangan nanokomposit tinggi sekitar 150%. Disarankan bahwa PEG membentuk lapisan pada nanofibrils dan meningkatkan ekstensibilitas tetapi membentuk lapisan antara kitin dan PLA yang mencegah efek penguat (Coltelli et al. 2019). Dalam pendekatan lain, kitin yang diperoleh dari kepiting dibuat menjadi nanowhisiker dengan hidrolisis asam dan kemudian dengan mengolah bubuk kitin dalam larutan KOH 5% dan direbus selama 6 jam. Serbuk yang diperoleh diputihkan dan dilarutkan dengan 3 mol/LHCl pada 102 °C selama 5 jam. Nanowhisiker kitin yang diperoleh selanjutnya dimodifikasi dengan mencangkok l-laktida melalui polimerisasi pembukaan cincin. Kumis kitin yang dimodifikasi dan tidak dimodifikasi ditambahkan ke dalam PLA yang dilarutkan dalam kloroform dan kemudian dicor larutan untuk membentuk film. Studi

FTIR dan NMR mengkonfirmasi keberhasilan pencangkakan rantai samping oligo (L-laktida) ke

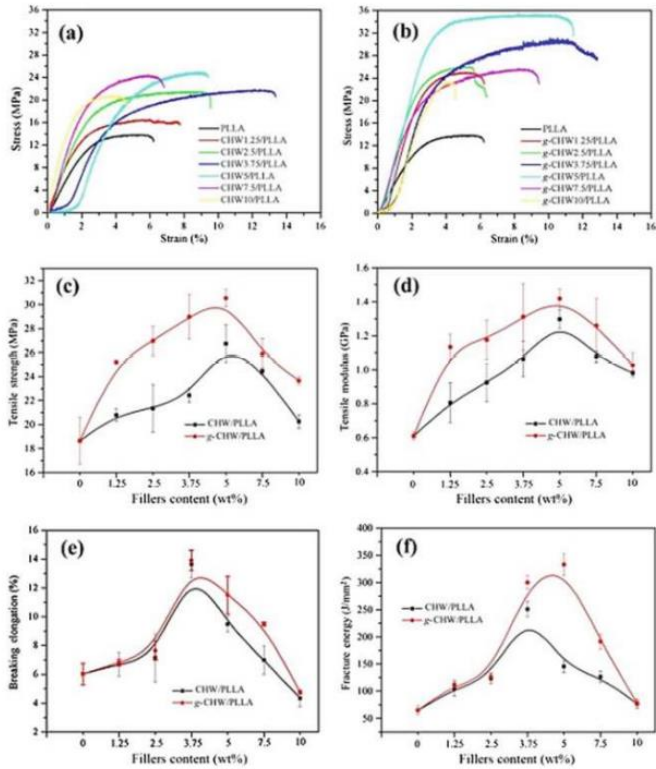


Gambar 12 SEM (Sebuah dan b) dan TEM (c dan d) gambar nanowhiser kitin yang tidak dimodifikasi dan dicangkakkan (Li et al. 2016). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

kitin. Tidak ada perubahan besar dalam kristalinitas atau ukuran kristal kitin yang terlihat karena pencangkakan. Panjang nanowhiser yang tidak dimodifikasi adalah antara 200 dan 800 nm dan diameter antara 20 dan 70 nm (Li et al.2016). Relatif, kumis yang dicangkakkan memiliki panjang antara 150 dan 400 nm dan diameter antara 5

dan 55 nm. Penurunan diameter fibril dan dispersibilitas yang lebih baik dalam matriks PLA terlihat pada gambar SEM dan TEM (Gbr. 2).12) (Li dkk. 2016). Ketika dimasukkan ke dalam PLA, kumis menyebabkan perubahan tingkat kristalisasi dan pembentukan spherulite. Penurunan marjinal dalam kristalinitas dan suhu leleh juga diperhatikan. Peningkatan substansial dalam sifat tarik dengan kekuatan tertinggi 30,5 MPa dan modulus 1,5 GPa dan energi patah 333 J/mm diperoleh ketika 5% kumis yang dicangkokkan digunakan sebagai penguat (Gbr. 2b). 13). Nanokomposit yang mengandung PLA yang dicangkokkan juga menunjukkan sitokompatibilitas yang lebih baik terhadap sel MC3T3-E1. Efek yang cukup besar dari nanokristal kitin (diameter antara 7 dan 25 nm, panjang antara 314 dan 1571 nm dan kristalinitas 91%) pada kristalinitas, perilaku termal dan sifat mekanik diamati ketika digunakan sebagai penguat untuk trietil sitrat poli plastis (asam laktat).

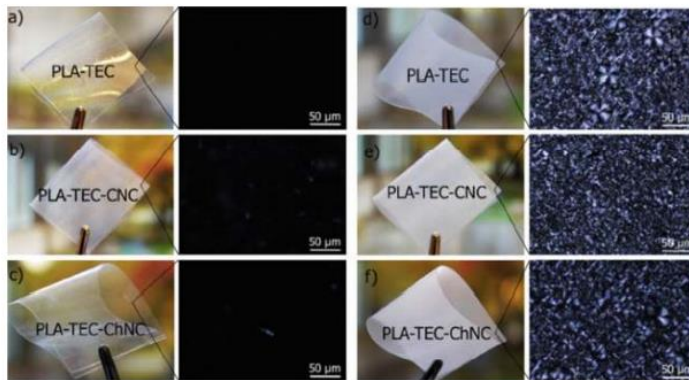
Nanopartikel kitin dan plasticizer dilarutkan dan dibuat larutan dan ditambahkan ke dalam ekstruder bersama PLA. Jumlah komponen yang ditambahkan dikontrol untuk mendapatkan konsentrasi nanokristal 1%. Pelet PLA yang diekstrusi dicetak dengan kompresi menjadi film dengan memproses pada 190 °C selama 3,5 menit pada tekanan 4 MPa. Setelah kompresi, film didinginkan ke suhu kamar pada dua tingkat yang berbeda (cepat pendinginan selama 5 menit atau pendinginan lambat selama 20 menit) untuk memvariasikan laju kristalisasi dan tingkat PLA. Perbedaan laju pendinginan mempengaruhi kristalinitas, transparansi dan sifat tarik, terutama perpanjangan. Pendinginan yang lebih cepat memberikan film dengan transparansi yang lebih tinggi (Gbr.15) dan kristalinitas dan peningkatan sifat tarik diamati sampai tulangan 1% (Herra et al. 2016). Perubahan sifat tarik nanokomposit PLA yang diperoleh dengan menggunakan pendinginan cepat atau lambat ditunjukkan pada Tabel9 dan Gambar. 14.



Gambar 13 Pengaruh penambahan nanowhisiker kitin yang tidak dimodifikasi dan dicangkokkan pada sifat tarik nanokomposit PLA (Li et al. 2016). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

Tabel 9 Pengaruh pendinginan cepat (FC) dan pendinginan lambat (SC) pada sifat tarik film PLA dengan dan tanpa nanopartikel kitin (Herra et Al. 2016). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

Jenis PLA	Menghubungkan kekuatan (MPa)	Terakhir kekuatan (MPa)	muda modulus (IPK)	Perpanjangan pada istirahat (%)	pekerjaan dan patah (MJ/m ²)
FC PLA-TEC	3.7 ± 1.2	22.4 ± 4.1	0,3 ± 0.2	305 ± 53	32.2 ± 12.8
FC-PLA-TEC-ChNc	21.4 ± 3.9	21.0 ± 2.0	1.2 ± 0.4	262 ± 24	36.9 ± 4.4
SC PLA-TEC	19.6 ± 1.2	15.8 ± 1.1	0.6 ± 0.1	91 ± 38	16.1 ± 6.4
SC-PLA-TEC-ChNc	20.9 ± 0,5	20.3 ± 0,5	1.0 ± 0,3	16 ± 4	2.9 ± 0.8

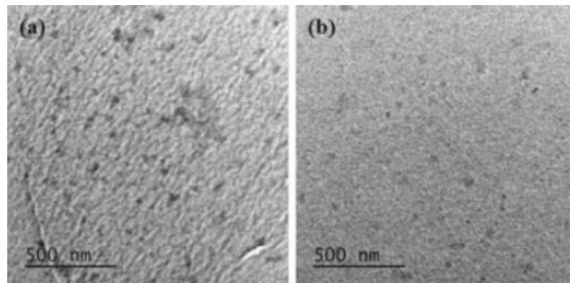


Gambar 14 Pengaruh laju pendinginan pada transparansi PLA yang diperkuat nanowhisiker rapi dan kitin seperti yang terlihat secara visual dan menggunakan mikroskop optik (Herra et al. 2016). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

5 PLA Mengandung Bahan Nano Pati

Nanocrystals pati dibuat dari dua sumber, pati jagung amilopektin tinggi dan pati asetat disiapkan dan digunakan sebagai pengisi untuk PLA. Nanokristal pati dibuat dengan hidrolisis asam dan kemudian diasetilasi

dengan perlakuan dengan asam asetat glasial untuk mendapatkan derajat substitusi 0,99. Nanopartikel PLA dan pati didispersikan dalam diklorometana dan dilemparkan ke pelat kaca untuk membentuk film. PLA yang diperkuat dengan pati yang tidak dimodifikasi memiliki morfologi yang lebih kasar karena aglomerasi partikel dan ikatan yang buruk antara PLA dan pati. Kekasaran ditemukan meningkat dengan meningkatnya jumlah nanofiller. Asetilasi pati meningkatkan adhesi dan interaksi antar muka yang memberikan permukaan yang relatif lebih halus pada nanokomposit (Gbr. 2b).¹⁵. Sebuah penurunan yang signifikan (25%) dalam permeabilitas oksigen adalah



Gambar 15 Gambar TEM dari film PLA yang mengandung nanokristal pati yang tidak dimodifikasi (kiri) dan asetilasi (kanan) menunjukkan perbedaan dalam aglomerasi dan interaksi (Takkalkar et al. 2019). Direproduksi dengan izin dari Springer Nature

diamati untuk film yang diperkuat dengan nanostarch asetat. Demikian pula, sifat mekanik nanofiller pati yang mengandung PLA lebih tinggi tetapi elongasi lebih rendah dibandingkan dengan PLA rapi (Takkalkar et al.2019).

Nanokristal pati dibuat dengan hidrolisis asam pati dengan perlakuan asam sulfat pada suhu 40 °C selama 5 hari. Asam laktat dicangkokkan ke nanocrystals menggunakan tetrahydrofuran pada 60 ° C selama 30 menit. Nanokomposit PLA dibuat dengan menambahkan pati yang dimodifikasi (5-30%) ke dalam larutan PLA dan

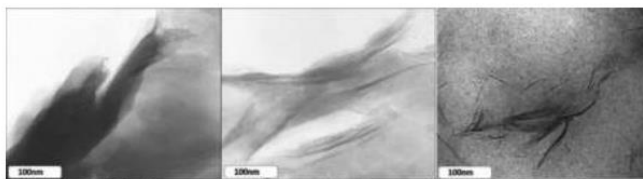
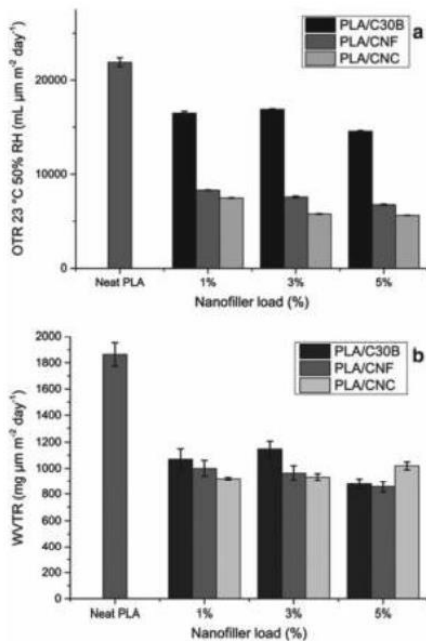
kemudian menuangkan larutan ke dalam film (Zamir et al.2019). Sampel yang dicangkok menunjukkan penurunan konsentrasi atom CH dari 13 menjadi 4% dan peningkatan konsentrasi COO yang mengkonfirmasi pencangkokan. Tidak ada perubahan struktur kristal atau % kristalinitas pati sebelum dan sesudah penyambungan. Peningkatan yang cukup besar dalam stabilitas termal dengan kehilangan berat awal sebesar 4% untuk sampel yang dicangkokkan dibandingkan dengan 37% untuk sampel yang tidak dicangkok disarankan karena hidrofobisitas yang diberikan setelah pencangkokan yang juga dikonfirmasi oleh pengukuran sudut kontak. Dalam hal nanokomposit, Tg dari PLA tidak menunjukkan perubahan besar tetapi suhu kristalisasi dingin menurun dari 124 menjadi 113 °C ketika 30% nanokristal pati yang dimodifikasi dimasukkan. Penambahan hingga 5% nanokristal pati yang dimodifikasi memang meningkatkan kristalisasi PLA tetapi kristalisasi menurun pada konsentrasi yang lebih tinggi. 2019).

Alih-alih langsung menambahkan nanomaterial ke dalam PLA, pendekatan baru menggabungkan nanocrystals selulosa dengan pati dan poli (vinil alkohol), electrospinning campuran dan kemudian menambahkan serat electrospun ke PLA untuk membentuk film diikuti. Penambahan nanocrystals selulosa ke dalam nanofibers pati telah meningkatkan dispersibilitas polimer di PLA. Meskipun pati dan selulosa memiliki kristalinitas yang buruk, tidak ada pengaruh besar pada kristalinitas film PLA campuran (Dicastillo et al. 2017). Peningkatan marginal dalam kekuatan dan pemanjangan diamati pada film PLA tetapi aglomerasi terjadi pada konsentrasi yang lebih tinggi. Penurunan transparansi dan permeabilitas uap air juga dikaitkan dengan adanya serat electrospun yang mengandung nanopartikel selulosa (Dicastillo et al. 2017).

6 Komposit PLA yang Diperkuat Nanoclay

Nanoclay dengan dimensi dan sifat yang berbeda telah digunakan untuk memperkuat atau meningkatkan kinerja PLA. Sebuah nanoclay C30B didispersikan dalam diklorometana dan diultrasonikasi selama 3 jam pada 200 W dan dihomogenkan selama 90 menit. Larutan PLA juga dipradispersi dalam diklorometana dan digabungkan dengan larutan nanoclay. Suspensi dilemparkan ke cetakan, disembuhkan pada 23 ° C selama 16 jam dan kemudian dikeringkan pada 50 ° C selama 24 jam untuk membentuk film. Dibandingkan dengan kristal nanoselulosa atau serat nano selulosa yang terbuat dari serat sisal, PLA yang diperkuat tanah liat memiliki penghalang oksigen yang lebih rendah, sifat mekanik dan juga termal (Gbr. 1).16) (Trifol dkk. 2016).

Gambar 16 Perbandingan permeabilitas oksigen dan uap air PLA mengandung selulosa nanofibers, nanocrystals dan nanoclay C30B (Trifol et al. 2016). Direproduksi dengan izin dari John Wiley and Sons



Gambar 17 Gambar TEM yang menggambarkan perilaku interkalasi film PLLA yang dimodifikasi dengan MMT (kiri), 350 yang dimodifikasi secara organik (tengah) dan tanah liat C30B (kanan) (Fordiani et al. 2013). Direproduksi dengan izin dari John Wiley and Sons

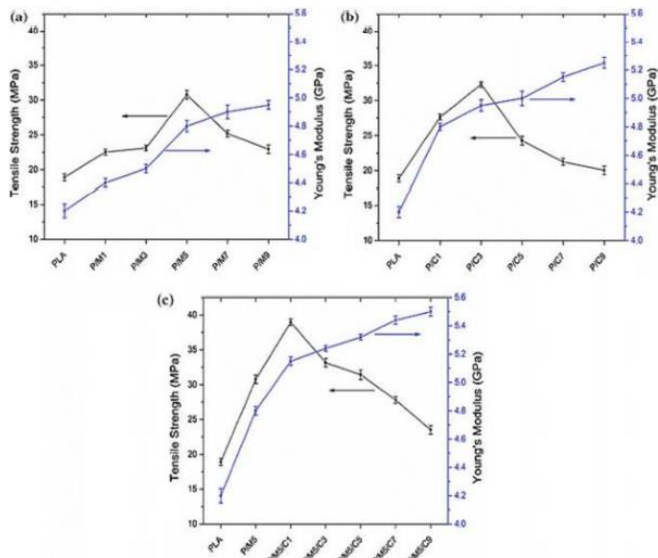
Oleh karena itu, nanokomposit hibrida dibuat menggunakan kombinasi PLA, nanoclay dan nanofibers selulosa. Tanah liat yang digunakan adalah montmorillonit (MMT) termodifikasi organo dengan ukuran partikel 16–22 μ m dan dimodifikasi menggunakan octadecylamine. Nanowhisker selulosa dipisahkan dari selulosa mikrokristalin menggunakan ekstraksi kimia berurutan dan pendekatan ultrasonifikasi. Kumis selulosa yang diekstraksi digabungkan dengan PLA dan MMT yang dimodifikasi dan dilemparkan ke dalam film. PLA ditemukan memiliki interaksi polar dengan tanah liat dan selulosa. Sifat tarik film hibrida meningkat hingga kandungan selulosa 3% dan keuletan film juga meningkat (10-90%). Meskipun nanoclay terdispersi dengan baik dan terinterkalasi dengan PLA, disarankan bahwa modifikasi selulosa untuk meningkatkan interaksi mungkin akan menghasilkan sifat film yang lebih baik (Arjmandi et al.2015a; b). Pendekatan modifikasi hijau digunakan untuk meningkatkan interkalasi nanoclay

dengan PLA (Fordiani et al.2013). Untuk mencapai interkalasi yang ditingkatkan, kompleks yang mengandung ulvan dan glikoprotein diekstraksi dari rumput laut dan digunakan sebagai aditif untuk PLA dan peningkatan sifat dipelajari menggunakan tanah liat C30B dan MMT. Gambar TEM (Gbr.17) menunjukkan interkalasi yang jauh lebih baik dan agregasi yang lebih sedikit untuk film yang mengandung lempung yang dimodifikasi dibandingkan dengan film yang mengandung C30B atau MMT. Ditemukan bahwa nanoclay meningkatkan kinetika kristalisasi dan juga menyebabkan penurunan energi antarmuka yang mengarah ke interkalasi yang lebih baik.

Dalam upaya untuk meningkatkan sifat film PLA hibrida, nanowhisker selulosa yang diperoleh dari MCC dimodifikasi melalui hidrolisis asam untuk mendapatkan ukuran partikel rata-rata 50 μm dan kemudian dikombinasikan dengan PLA dan nanoclay. Konstituen

hibrida digabungkan bersama menggunakan kloroform dan dilemparkan ke dalam film dengan tingkat nanoclay dan selulosa yang berbeda (Arjmandi et al.2016). Kehadiran nanowhisker selulosa secara substansial meningkatkan biodegradasi sampel dan karenanya penurunan berat badan. Peningkatan kandungan selulosa menyebabkan degradasi yang lebih tinggi dengan kehilangan berat maksimum 2,5% setelah 8 minggu mengubur sampel yang mengandung 9% selulosa. Demikian pula, stabilitas termal meningkat sedangkan energi aktivasi menurun karena penambahan selulosa, terutama di atas 5%. Disarankan bahwa selulosa dan PLA memiliki interaksi kutub yang menyebabkan peningkatan kekuatan tarik dari 18 menjadi 36MPa pada penguatan 1%. Namun, aglomerasi nanowhiskers pada konsentrasi yang lebih tinggi menyebabkan penurunan kekuatan yang substansial. Perpanjangan film juga menunjukkan tren yang sama dengan kekuatan, tetapi modulus film terus meningkat dengan kandungan

selulosa. Nanoclay dalam film hibrida menunjukkan interkalasi yang baik dan membantu dalam dispersi nanowhisker selulosa. Kehadiran nanowhisers mengurangi transmisi uap air tetapi tidak mempengaruhi transparansi (Arjmandi et al. 2016). Meskipun kehadiran nanoclay ditemukan untuk meningkatkan sifat kinerja film PLA hibrida, peran nanoclay sehubungan dengan kemampuannya untuk menggantikan nanowhisers selulosa tidak dipahami dengan jelas. Ketika kandungan nanoclay meningkat secara progresif dan kandungan selulosa menurun, ditemukan bahwa kekuatan tarik tertinggi dapat diperoleh pada kandungan selulosa 1% dan kandungan nanoclay 4% dengan peningkatan daktilitas 79% (Gbr. 2).18). Kandungan nanoclay yang lebih tinggi meningkatkan stabilitas termal sedangkan selulosa meningkatkan biodegradabilitas Arjmandi et al.2015a, b).



Gambar 18 Pengaruh jumlah nanoclay dan nanowhisker selulosa pada sifat tarik film PLA (Arjmandi et al. 2015a; b). Direproduksi dengan izin dari Springer Nature

Tabel 10 Sifat film yang dikembangkan dari CNF, PLA dan campurannya yang mengandung 1% kasein as compatibilizer etAl. 2018). Direproduksi dengan izin dari Elsevier

(Parameter Khakola	CNF	PLA	CNF/PLA	CNF/PLA, 1% kasein
Massa jenis (g/cm ³)	1.23 ± 0,01	1.21 ± 0,01	1.02 ± 0,02	1.08 ± 0,01
Kekuatan tarik (MPa)	86 ± 6	1.6 ± 0.1	70 ± 5	78 ± 5
Indeks tarik (Nm/g)	99 ± 12	1.4 ± 0,0	69 ± 3	72 ± 5
Tegangan putus (%)	1.8 ± 0.2	318 ± 13	2.3 ± 0,3	5.3 ± 0,3
Modulus elastisitas (GPa)	10.1 ± 0.6	0,01	5.6 ± 0.4	6.3 ± 0,3
Energi tarik yang diserap (J/g)	1.1 ± 0.1	3.3 ± 0.2	1.7 ± 01	2.7 ± 01

7 Protein yang Kompatibel PLA Nanokomposit

Pendekatan lain untuk meningkatkan kompatibilitas antara nanopartikel selulosa dan PLA dicoba dengan menggunakan kasein protein susu (Khakola et al. 2018). Selulosa nanofibril dibuat dengan mengolah pulp kraft kayu lunak yang diputihkan dengan natrium untuk defibrilasi dan kemudian dengan pemurnian mekanis. Protein kasein didispersikan dalam air dan kemudian diolah dengan bikarbonat dan dipanaskan selama 30 menit pada suhu 45 °C untuk menyebabkan denaturasi termal. Kasein dan suspensi nanofibril selulosa digabungkan dengan lateks PLA dan disaring untuk membentuk bubuk yang kemudian dicetak dengan kompresi pada 80 °C, 1800 Pa selama 2 jam. Kerja adhesi (52–60 mJ/m²) dan gaya tarik (372– 420 mJ/m²) menunjukkan peningkatan yang cukup besar dengan penggabungan kasein ke dalam PLA dan selulosa nanofibrils yang mengandung film. Kehadiran kasein

meningkatkan densitas film komposit, menurunkan jumlah rongga yang dapat meningkatkan distribusi tegangan yang lebih baik antara matriks dan penguat yang menegaskan bahwa kasein berfungsi sebagai kompatibilizer. Akibatnya, peningkatan yang cukup besar dalam sifat tarik telah terjadi (Tabel10). Dilaporkan bahwa PLA yang kompatibel dengan kasein dapat digunakan untuk mengembangkan bahan kemasan berbasis selulosa berbentuk 3D.

8 Kesimpulan dan Perspektif Masa Depan

Nanomaterials telah terbukti efektif meningkatkan sifat kinerja bahan berbasis poli (asam laktat). Serat nano berbasis selulosa, nanopartikel yang berasal dari kayu dan sumber nonkayu termasuk bakteri telah banyak digunakan sebagai penguat/pengisi. Beberapa penulis juga telah mengembangkan nanokomposit PLA hibrida yang menggabungkan nanoclay, protein atau aditif

lainnya untuk meningkatkan kompatibilitas antara PLA dan aditif. Demikian pula, modifikasi kimia seperti pencangkakan juga telah diadopsi. Dimasukkannya bahan nano terutama menyebabkan peningkatan sifat mekanik, penurunan transmisi air dan oksigen dan bahkan ketahanan terhadap panas dan radiasi UV. Namun, penggunaan nanofiller di atas konsentrasi optimal telah menyebabkan penurunan sifat termasuk transparansi, kekuatan dan modulus. Meskipun sebagian besar studi mengkonfirmasi beberapa interaksi antara nanomaterial dan PLA dan peningkatan sifat, kesesuaian komposit yang dikembangkan untuk aplikasi spesifik belum dilaporkan. Menggunakan literatur yang tersedia, studi tambahan harus dilakukan untuk menyesuaikan komposit untuk aplikasi yang ditargetkan, terutama untuk aplikasi makanan dan medis karena keunggulan yang melekat pada PLA. Demikian pula, teknik pemrosesan baru selain pengecoran solusi konvensional dan cetakan injeksi harus dipelajari.

Referensi

Arjmandi R, Hassan A, Haafiz MKM, Zakaria Z (2015) Partial replacement effect of montmorillonite with cellulose nanowhiskers on polylactic acid nanocomposites. *Int J Biol Macromol* 81:91–99

Arjmandi R, Hassan A, Eichhorn SJ, Haafiz MKM, Zakaria Z, Tanjung FA (2015) Enhanced ductility and tensile properties of hybrid montmorillonite/cellulose nanowhiskers reinforced polylactic acid nanocomposites. *J Mater Sci* 50(8):3118–3130

Arjmandi R, Azman Hassan A, Haafiz MKM, Zakaria Z, Islam MS (2016). Effect of hydrolysed cellulose nanowhiskers on properties of

montmorillonite/polylactic acid nanocomposites. *Int J Biol Macromol* 82:998–1010

Chuensangjun C, Kanomata K, Kitaoka T, Chisti Y, Sirisansaneeyakul S (2019a) Surface-modified cellulose nanofibers-graft-poly (lactic acid)s made by ring-opening polymerization of L-lactide. *J Polym Environ* 27(4):847–861

Chuensangjun C, Kitaoka T, Chisti Y, Sirisansaneeyakul S (2019b) Chemo-enzymatic preparation and characterization of cellulose nanofibers-graft-poly (lactic acid)s. *Eur Polymer J* 114:308–318

Coltelli M-B, Cinelli P, Gigante V, Aliotta L, Morganti P, Panariello L, Lazzeri A (2019) Chitin nanofibrils in poly

(lactic acid)(PLA) nanocomposites: dispersion and thermo-mechanical properties. *Int J Mol Sci* 20(3):504

Fordiani F, Aubry T, Pillin I, Grohens Y (2013) Enhancement of polylactide nucleation by montmorillonites intercalated with a green seaweed byproduct. *J Appl Polym Sci* 127(1):724–732

Fortunati E, Luzi F, Puglia D, Petrucci R, Kenny JM, Torre L (2015) Processing of PLA nanocomposites with cellulose nanocrystals extracted from *Posidonia oceanica* waste: innovative reuse of coastal plant. *Indus Crops Products* 67:439–447

Gan I, Chow WS (2019) Synthesis of phosphoric acid-treated sugarcane bagasse cellulose nanocrystal and its thermal properties enhancement for poly (lactic acid)

nanocomposites. *J Thermoplas Compos Mater* 32(5):619–634

Gitari B, Chang BP, Misra M, Navabi A, Mohanty AK (2019) A comparative study on the mechanical, thermal, and water barrier properties of PLA nanocomposite films prepared with bacterial nanocellulose and cellulose nanofibrils. *BioResources* 14(1):1867–1889

Haafiz MKM, Hassan A, Khalil HPSA, Fazita MRN, Islam MS, Inuwa IM, Marliana MM, Hussin MH (2016) Exploring the effect of cellulose nanowhiskers isolated from oil palm biomass on polylactic acid properties. *Int J Biol Macromol* 85:370–378

Herrera N, Salaberria AM, Mathew AP, Oksman K (2016) Plasticized polylactic acid nanocomposite films with

cellulose and chitin nanocrystals prepared using extrusion and compression molding with two cooling rates: effects on mechanical, thermal and optical properties. *Compos A Appl Sci Manuf* 83:89–97

Iglesias Montes ML, Luzi F, Dominici F, Torre L, Cyras VP, Manfredi LB, Puglia D (2019) Design and characterization of PLA bilayer films containing lignin and cellulose nanostructures in combination with umbelliferone as active ingredient. *Front Chem* 7:157

BAB 4 PENGARUH SELULOSA NANOKRISTAL PADA SIFAT MEKANIK KOMPOSIT MATERIAL

Tuntutan masyarakat modern semakin mendorong pergeseran dari bahan berbasis minyak bumi yang tidak terbarukan ke sumber daya terbarukan yang lebih berkelanjutan. Sebagai polimer alami yang paling umum di Bumi, selulosa telah menarik minat luas untuk digunakan sebagai aditif hijau atau pengganti bahan berbasis minyak bumi yang tidak berkelanjutan. Polimer selulosa tersusun secara alami menjadi serat selulosa semi-kristal mikro yang dapat didegradasi, biasanya dengan perlakuan kimia, untuk menghasilkan daerah kristalin skala nano dari polimer selulosa. Kristal nano ini

menampilkan rasio aspek tinggi dengan panjang dari 100 hingga 3000 nm dan lebar dari 3 hingga 50 nm. Mereka juga memiliki sifat mekanik yang sangat baik, sebanding dengan nanomaterial penguat sintetis berbiaya tinggi seperti nanotube karbon. Morfologi nanokristal selulosa (CNC) ini sangat bergantung pada bahan sumber selulosa alami dan kondisi preparasi CNC yang digunakan. Ketika menggunakan CNC sebagai bahan pengisi penguat dalam matriks polimer, nanokomposit yang dihasilkan sering menampilkan sifat yang bergantung pada morfologi pengisi. Bab ini membahas kelebihan, kekurangan dan perbedaan antara sumber CNC dengan fokus pada morfologi CNC yang dihasilkan dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik CNC yang mengandung polimer nanokomposit. Selain itu, temuan baru-baru ini di bidang nanokomposit polimerik multifiller yang diperkuat CNC akan disorot dan dikontraskan dengan nanokomposit polimerik CNC monofiller. Ketika menggunakan CNC sebagai bahan pengisi penguat dalam matriks polimer,

nanokomposit yang dihasilkan sering menampilkan sifat yang bergantung pada morfologi pengisi. Bab ini membahas kelebihan, kekurangan dan perbedaan antara sumber CNC dengan fokus pada morfologi CNC yang dihasilkan dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik CNC yang mengandung polimer nanokomposit. Selain itu, temuan baru-baru ini di bidang nanokomposit polimerik multifiller yang diperkuat CNC akan disorot dan dikontraskan dengan nanokomposit polimerik CNC monofiller. Ketika menggunakan CNC sebagai bahan pengisi penguat dalam matriks polimer, nanokomposit yang dihasilkan sering menampilkan sifat yang bergantung pada morfologi pengisi. Bab ini membahas kelebihan, kekurangan dan perbedaan antara sumber CNC dengan fokus pada morfologi CNC yang dihasilkan dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik CNC yang mengandung polimer nanokomposit. Selain itu, temuan baru-baru ini di bidang nanokomposit polimerik multifiller yang diperkuat CNC akan disorot dan

dikontraskan dengan nanokomposit polimerik CNC monofiller. kekurangan dan perbedaan antara sumber CNC dengan fokus pada morfologi CNC yang dihasilkan dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik CNC yang mengandung polimer nanokomposit. Selain itu, temuan baru-baru ini di bidang nanokomposit polimerik multifiller yang diperkuat CNC akan disorot dan dikontraskan dengan nanokomposit polimerik CNC monofiller. kekurangan dan perbedaan antara sumber CNC dengan fokus pada morfologi CNC yang dihasilkan dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik CNC yang mengandung polimer nanokomposit. Selain itu, temuan baru-baru ini di bidang nanokomposit polimerik multifiller yang diperkuat CNC akan disorot dan dikontraskan dengan nanokomposit polimerik CNC monofiller.

1. Pendahuluan

Selulosa polimer alami telah digunakan oleh manusia selama ribuan tahun dan masih dapat ditemukan secara umum saat ini, seperti sebelumnya, dalam berbagai aplikasi termasuk rumah kayu, buku kertas, dan pakaian berbahan katun. Menjadi polimer alami yang paling melimpah di Bumi, selulosa telah digunakan untuk aplikasi yang luas di berbagai demografi (Ummartyotin dan Manuspiya2015). Selulosa umumnya dikenal sebagai polisakarida linier dengan unit berulang selobiosa.

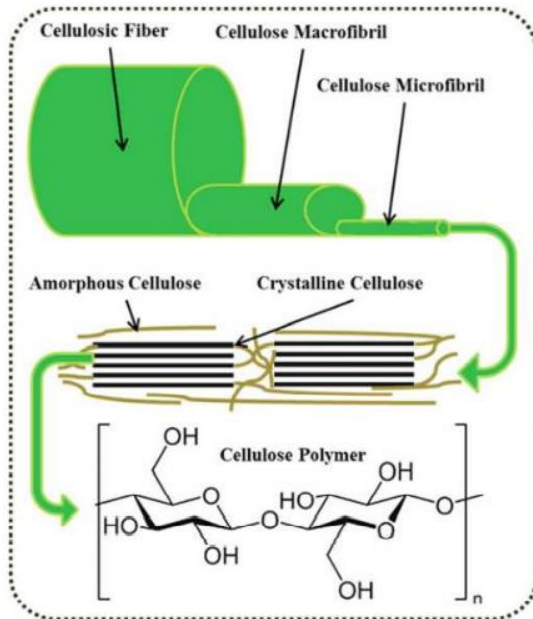
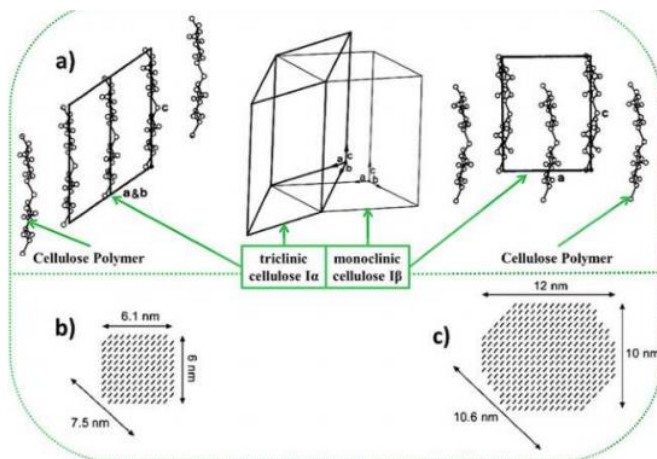


Fig. 1 Schematic illustration of a natural cellulosic fiber and its structural components

Selulosa terutama ditemukan di hutan di mana pohon dianggap sebagai sumber yang paling penting dan melimpah, namun selulosa dapat ditemukan di semua tanaman dalam berbagai derajat (Beck-Candanedo et al. 2005). Selain itu, selulosa dapat ditemukan pada bakteri (Romawi dan Musim Dingin).2004), alga (Revol 1982) dan

banyak bahan alami lainnya (de Rodriguez et al. 2006), (de Menezes dkk. 2009). Menariknya hanya ada satu sumber hewani selulosa, yang ditemukan pada hewan invertebrata laut tunicate (Zhao dan Li2014). Terlepas dari sumbernya, selulosa hampir selalu tersusun di alam sebagai makro atau mikrofibril yang mengandung daerah kristalin dari rantai polimer selulosa yang teratur dan daerah amorf dengan rantai polimer selulosa yang tidak teratur. Semua selulosa yang disintesis secara alami dibentuk sebagai Selulosa I yang memiliki dua struktur, selulosa metastabil triklinik I α dan selulosa monoklinik stabil I β struktur kristal (Gbr. 2). Selulosa alam juga dapat diubah menjadi Selulosa II, Selulosa III dan Selulosa IV menggunakan berbagai perlakuan termal atau kimia (Ciolacu dan Popa2011). Jumlah selulosa yang ada dalam bahan yang mengandung selulosa tertentu, persentase selulosa yang berbentuk kristal, dan polimorf struktural dari selulosa kristal yang ada sangat bergantung pada sumber selulosa tertentu. Sumber tanaman seperti kayu

mengandung kira-kira 50% selulosa, di mana hanya sekitar 50% yang berbentuk kristal, dan selulosa kristal tersusun di kedua selulosa I.α dan akuβ struktur kristal (Park et al. 2010). Sebagai alternatif, selulosa turunan tunik yang mengandung tunik kira-kira 60% selulosa.



Gambar 2 a Ilustrasi skema perbedaan antara selulosa triklinik Ia dan selulosa monoklinik Ib struktur kristal. Penampang melintang khas dari **b**) bersumber dari tanaman dan **c**) CNC bersumber dari tunicate. Diadaptasi dari Sugiyama et al. (1991) dan Elazzouzi-Hafraoui dkk. (2007)

yang antara 70 dan 95% kristal dan diatur hampir secara eksklusif di β struktur kristal (Berrill 1950).

Yang semakin menarik saat ini adalah isolasi kristal selulosa skala nano dari sumber daya alam dan pemanfaatannya sebagai penguat mekanis dalam komposit polimer. Untuk mengisolasi nanokristal selulosa (CNC) para peneliti telah menggunakan berbagai metode individu dan gabungan, yang umumnya termasuk dalam kategori perlakuan kimia, perlakuan mekanis atau perlakuan enzimatik (Klemm et al. 2011). Metodologi isolasi bukanlah fokus dari bab ini dan dijelaskan secara lebih rinci oleh orang lain (Le Normand et al. 2014) (Jonoobi dkk. 2015). Namun, mengingat luasnya cakupan sumber selulosa alami dan metode isolasi CNC, jelas bahwa CNC yang diisolasi dari sumber berbeda dengan metodologi isolasi CNC yang sama atau berbeda akan menghasilkan produk CNC dengan rentang morfologi yang luas. Fokus dari bab ini adalah untuk

menguji pengaruh morfologi CNC pada sifat-sifat nanokomposit polimer tertanam CNC. Perhatian khusus akan diberikan pada sifat mekanik nanokomposit polimer, dan bagaimana sifat tersebut berubah ketika morfologi penguat CNC bervariasi. Untuk menentukan ruang lingkup yang realistis untuk bab ini, diskusi akan terbatas pada komposit polimer berbasis CNC di mana CNC dalam bentuk batang kristal individu yang terpisah, juga dijelaskan di seluruh literatur sebagai kumis selulosa atau selulosa nanokristalin (NCC).

2 Nanoselulosa

2.1 Keuntungan pada Skala Nano

Pertama kali diisolasi oleh ahli kimia Prancis Anselme Payen pada tahun 1839, selulosa ada di mana-mana dalam masyarakat modern (Purves 1954). Namun, baru pada awal 1980-an bahan nanoselulosa mulai menarik

minat luas dari komunitas ilmiah (Turbak et al.1983). Nanomaterials secara luas didefinisikan sebagai bahan dengan setidaknya satu dimensi dalam skala nano. Oleh karena itu, nanoselulosa hanya mewakili beberapa susunan selulosa dengan satu atau lebih dimensi skala nano. Salah satu keuntungan utama nanoselulosa dibandingkan dengan selulosa curah adalah luas permukaan spesifiknya yang tinggi (Kim et al.2002). Luas permukaan yang tinggi ini memungkinkan tingkat interaksi yang lebih besar antara nanoselulosa dan matriks polimer di mana nanoselulosa tertanam di dalamnya. Pada bagian ini, kelas yang berbeda dari nanoselulosa akan dijelaskan secara singkat dengan penekanan pada CNCs

2.2 Kelas Nanoselulosa

Tidak ada pada titik ini nomenklatur standar untuk menggambarkan bahan nanoselulosa. Umumnya,

selulosa diketahui mengandung amorf dan daerah kristal dan nanoselulosa hanyalah segmen dari polimer selulosa dengan setidaknya satu dimensi (biasanya diameter) dalam skala nano. Nanoselulosa yang mengandung daerah amorf dan kristal biasanya tersusun menjadi struktur berserat yang umumnya dilambangkan sebagai selulosa nanofibrilasi (NFC) atau serat nano selulosa (CNFs). Ketika daerah selulosa amorf dihilangkan (biasanya dengan hidrolisis asam), yang tersisa adalah batang yang tidak jelas seperti kristal selulosa. Ini disebut sebagai selulosa nanokristalin (NCC) atau nanokristal selulosa (CNC). Demikian juga, selulosa dengan dimensi skala mikro dan struktur kristal disebut sebagai selulosa mikrokristalin (MCC). Ketika selulosa skala mikro mengandung daerah kristal dan amorf, hasil struktur berserat digambarkan sebagai selulosa mikrofibrilasi (MFC). Istilah dan singkatan lain telah digunakan untuk menggambarkan bahan skala nano dan skala mikro yang bersumber dari selulosa di seluruh literatur. Namun

dalam konteks bab ini, kami membatasi diri untuk membahas pengaruh bahan nano selulosa kristalin (CNC dan NCC) pada sifat mekanik nanokomposit polimer.

2.3 Kristal Nano Selulosa

Mengingatkan daerah kristal dalam serat dasar dari sumber selulosa alami, CNCs adalah kristal selulosa murni umumnya berbentuk seperti kumis atau batang tipis. Mereka menunjukkan panjang yang besar dibandingkan dengan lebar yang relatif sempit (Tabel1), yang berkontribusi pada rasio aspek tinggi (panjang/lebar) CNC. Morfologi CNC (rasio aspek, struktur kristal, polidispersitas dan kristalinitas) sangat bervariasi dan bergantung pada sumber selulosa, proses ekstraksi CNC

Tabel 1 Morfologi CNC dan variannya dengan bahan sumber CNC dan kondisi persiapan. L = panjang CNC dan W = lebar (diameter) CNC

Sumber	Metode persiapan	Panjang (nm)	Lebar (nm)	Aspek perbandingan (P/B)	Referensi
Kayu	H ₂ BEGITU ₄ hidrolisis	100-300	3-5	20-100	Beck-Candanedo dkk. (2005)
Kapas	Hidrolisis HCl	100-150	5-10	10-30	Araki dkk. (2001)
Rami	H ₂ BEGITU ₄ hidrolisis	70-200	5-15	~12	De Menezes et al. (2009)
Sisal	H ₂ BEGITU ₄ hidrolisis	100-300	3-5	~60	De Rodriguez dkk. (2006)
Tunicates	H ₂ BEGITU ₄ hidrolisis	> 1000	10-20	~100	Kimura dkk. (2005)
Bakteri	H ₂ BEGITU ₄ hidrolisis	100-1000	10-50	2-100	George dan Bawa (2010)
Bakteri	Hidrolisis HCl	160-420	15-25	7-23	George (2012)

dan metode yang digunakan untuk mengukur sifat morfologi. Lebar khas untuk CNC berada dalam kisaran 2-50 nm, dan panjang antara 100 dan 3000 nm tergantung pada bahan sumber, kondisi pemrosesan, dan teknik pengukuran (Habibi et al.2010). Bahan-bahan ini sangat kristal, dengan persen kristalinitas bervariasi dari 50 hingga 95% tergantung pada sumber selulosa, teknik pengukuran dan metode analisis data. Mengingat dimensi skala nanonya, CNC juga menunjukkan luas permukaan yang tinggi dalam kisaran 150–250 m² g⁻¹ (

Shaheen dan Emam 2018). Gugus hidroksil yang melimpah pada permukaan CNC memungkinkan beragam kemungkinan modifikasi kimia pada CNC termasuk eterifikasi, oksidasi, sililasi, esterifikasi, pencangkakan polimer, dan lainnya (Salas et al.2014). Hal ini memungkinkan CNC hidrofilik untuk digabungkan ke dalam matriks hidrofilik dan hidrofobik, asalkan kimia permukaan yang sesuai ditambahkan ke CNC sebelum dimasukkan ke dalam matriks polimer yang diinginkan. Banyaknya modifikasi permukaan CNC yang tersedia memberikan para peneliti beragam pendekatan eksperimental untuk menggabungkan CNC ke dalam matriks polimer. Dengan memasukkan CNC ke dalam matriks polimer, sifat nanokomposit yang dihasilkan dapat bervariasi. CNC terkenal untuk mengubah sifat termal, struktural, dan morfologi nanokomposit polimer; namun sifat mekanik seringkali paling sensitif terhadap penambahan CNC (Klemm et al.2011).

2.4 Produksi Komersial CNC

Produksi selulosa di seluruh dunia diperkirakan berada pada kisaran 1010-1011 ton per tahun (Azizi Samir et al. 2005). Untuk memenuhi permintaan yang meningkat dari akademisi, pemerintah, dan industri, produksi CNC di seluruh dunia dari stok selulosa yang melimpah ini meningkat volumenya, dan beragam sumber selulosa sedang digunakan. Baru-baru ini diusulkan oleh 'The Technical Association of the Pulp and Paper Industry' (TAPPI) bahwa pada tahun 2020 produksi dunia kotor bahan nanoselulosa dapat melebihi \$600 miliar (Endes et al. 2016). Ada banyak fasilitas produksi skala besar yang mampu mengisolasi kilogram CNC dari sumber berbasis tanaman. Yang terbesar adalah CelluForce© yang berbasis di Kanada, hasil kemitraan antara FPInovations dan Domtar Corporation, yang menawarkan kapasitas produksi CNC ~1000 kg CNC/hari (Sharma et al. 2019). Di Laboratorium Hasil Hutan di Madison Wisconsin USA,

CNC diekstraksi dari kayu dengan kecepatan ~10 kg/hari (Chauve dan Bras2014). Menurut laporan 2016 (Frost & Sullivan 2016), “Emerging Applications of Nanocellulose Technology”, beberapa organisasi swasta dan publik lainnya juga memproduksi CNC dengan kecepatan ~10 kg/hari termasuk perusahaan Israel Melodea Ltd, Dewan Penelitian Pertanian India, dan Blue Goose Biorefinery Kanada. Dalam upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dari isolasi CNC, (Mathew et al.2014) menggunakan cara mekanis dan kimia ringan untuk mengisolasi ~600 g/hari CNC dari aliran limbah yang mengandung selulosa di pabrik percontohan yang memproduksi bioetanol. Namun semua contoh ini bergantung pada sumber nabati terutama pulp kayu, dari mana untuk mengekstrak CNCs. Beberapa produksi CNC bakteri (~ 17 g/hari) (Chen et al.2018) dan alga CNCs (~36 g/hari) (El Achaby et al. 2018; Masaoka dkk. 2014; Masaoka dkk.1993) ada, namun skalanya jauh lebih kecil daripada sumber CNC berbasis pabrik. Tunicates juga

dikonversi ke CNC dalam jumlah yang sangat kecil, biasanya skala laboratorium beberapa gram atau kurang (Jonoobi et al. 2015; Zhao dan Li2014). Ada peningkatan minat dalam meningkatkan proses ini hingga skala pabrik percontohan (Dunlop et al.2018), dan baru-baru ini telah dilaporkan pemrosesan skala kilogram tunikata ke CNC yang pertama kali diketahui (Dunlop et al. 2020).

3 Sumber CNC

3.1 Tanaman

Sumber utama CNC yang diproduksi saat ini berasal dari tanaman, sebagian karena kelimpahan dan aksesibilitas alaminya. Ada juga infrastruktur yang sudah ada sebelumnya untuk memanen dan mengolah banyak sumber pabrik CNC. Contoh terbaik dari hal ini adalah CNC berbasis kayu, yang terutama bersumber dari pulp kayu Kraft yang diputihkan yang digunakan secara

konvensional untuk memproduksi kertas. Contoh lain termasuk industri pengemasan, farmasi dan tekstil yang masing-masing memiliki metode yang ada untuk pemanenan, perlakuan awal dan pemrosesan prekursor CNC berbasis tanaman (Moon et al. 2011). Secara umum pengolahan tanaman untuk mengisolasi CNC berbasis pabrik serupa dan terdiri dari dua langkah utama. Pertama, penghilangan bahan non-selulosa seperti hemiselulosa, lignin dan bahan lainnya; diikuti dengan penghilangan daerah selulosa amorf untuk menghasilkan CNC individual. Hidrolisis asam biasanya digunakan untuk menghilangkan daerah selulosa amorf, yang paling umum adalah proses hidrolisis asam sulfat. Ketika asam sulfat digunakan untuk mengekstraksi CNC, permukaan kristal nano dimodifikasi dengan gugus sulfat. Ini memberikan muatan permukaan negatif ke CNC, meningkatkan tolakan antara kristal, yang mengarah ke stabilitas CNC yang sangat meningkat dalam larutan berair. Dengan cara ini, banyak tanaman telah digunakan

untuk ekstraksi CNC, termasuk umbi kentang (Dufresne et al. 2000), gula bit (Leitner et al. 2007), rami (Habibi dan Dufresne 2008), kapas (ElazzouziHafraoui et al. 2007), dan banyak lainnya (de Rodriguez et al. 2006, Helmet dkk. 1996, Wang dan Mohini 2007, Zuluaga dkk. 2007). Sumber tanaman CNC mengandung campuran selulosa I α dan β struktur kristal; dengan tanaman tingkat tinggi seperti pohon dan semak yang mengandung lebih banyak selulosa, dan tumbuhan tingkat rendah seperti jamur dan alga yang mengandung lebih banyak selulosa I (de Souza Lima dkk. 2004).

3.2 Tunicate

Dinamakan karena 'tunik like' selulosa yang mengandung epidermis, tunicates unik di antara hewan dalam kemampuan mereka untuk biosintesis selulosa (Zhao dan Li 2014). Selulosa yang dihasilkan dalam tunikata disusun dalam mikrofibril dan bertindak sebagai struktur jaringan

tipe kerangka yang memperkuat; ini memberikan kekakuan dan dukungan pada protein dan bahan lipid yang tersisa yang terdiri dari tunik (Kimura dan Itoh2007). Pada tahun 2002 genom dari tunicata ascidian umum 'Ciona intestinalis' diurutkan untuk pertama kalinya, sebagian untuk meningkatkan pemahaman biosintesis selulosa dan fungsi dalam tunicates (Dehal et al.2002). Selama beberapa tahun terakhir, tunicates semakin dipandang sebagai sumber yang menarik untuk produksi CNC (Zhao dan Li).2014; Dunlop dkk.2018). Terutama, ini karena sifat unik yang ditunjukkan oleh CNC tunicate dibandingkan dengan CNC yang bersumber dari tanaman. CNC Tunicate menunjukkan rasio aspek tertinggi (~ 70– 100) dari semua sumber CNC. Selain itu, CNC turunan tunicata sebagian besar adalah selulosa I β alomorf, bukan campuran selulosa I α dan aku β struktur kristal ditampilkan di CNC bersumber tanaman. Mirip dengan CNC yang bersumber dari pabrik, isolasi CNC yang bersumber dari tunicate terjadi dalam dua langkah

umum. Pertama, tunik yang mengandung selulosa dibersihkan, dideproteinasi dan diputihkan untuk menghilangkan komponen tunik non selulosa. Selanjutnya selulosa tunik yang dimurnikan, disebut sebagai tunicin, dihidrolisis dalam asam untuk menghasilkan tunicat CNCs. Seperti halnya CNC pabrik, asam sulfat adalah asam yang paling umum digunakan untuk proses hidrolisis. Hal ini menyebabkan CNC dengan kelompok sulfat permukaan yang mengurangi aglomerasi dan meningkatkan stabilitas koloid dari CNC yang tersebar.

3.3 Sumber Lain

Banyak sumber selulosa lain yang ada, yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber CNC. Beberapa spesies bakteri memiliki kemampuan untuk biosintesis dan mensekresi mikrofibril selulosa. Mikrofibril yang disintesis secara bakteri menampilkan rasio aspek yang

tinggi, biasanya lebih tinggi dari 50 (Brown and Laborie2007). Bakteri yang tepat dan kondisi pertumbuhan yang digunakan akan menentukan morfologi dari CNC yang diisolasi. Salah satu bakteri umum yang dikenal sebagai *Acetobacter* menghasilkan mikrofibril selulosa yang sangat kristal dengan selulosa I . α struktur kristal (Tokoh et al. 1998). Namun, dengan mengubah kondisi kultur, lebar mikrofibril dan rasio selulosa I α menjadi selulosa I β dapat disesuaikan (Yamamoto dan Horn 1994). Menariknya, ketika beberapa spesies alga diperlakukan dalam asam, mikrofibril selulosa yang ada di dinding sel alga dapat dihidrolisis menjadi bentuk CNC. Seperti sumber selulosa lainnya, sifat-sifat CNC yang diisolasi bergantung pada bahan sumber alami dan kondisi persiapan. Alga *Micrasterias* dan *Valonia* memberikan contoh yang baik tentang kontras dalam sifat CNC di seluruh spesies ganggang. *Micrasterias* CNCs terutama selulosa I β dan menunjukkan penampang persegi panjang (Hanley et al.

1997), sedangkan Valonia CNCs terutama selulosa Ia dan menunjukkan penampang persegi (Revol 1982). Selulosa diisolasi dari Valonia telah terbukti menampilkan kristalinitas yang luar biasa, dalam beberapa kasus melebihi 95% kristalinitas (Sugiyama et al. 1991).

4 Komposit

Bahan komposit berbasis selulosa sudah ada sejak ribuan tahun yang lalu dan telah melayani banyak fungsi. Karena kemajuan teknologi dan kemajuan ilmu pengetahuan, hari ini kami dapat menyiapkan bahan nanokomposit berbasis selulosa. Mengingat bahwa berbagai macam bahan nano berbasis selulosa saat ini ada dengan morfologi yang beragam, kami akan mempersempit fokus bab ini menjadi bahan nanokomposit berbasis selulosa yang komposisinya terbatas pada CNC yang tergabung dalam matriks polimer. Karena semua sumber selulosa menghasilkan CNC yang sangat polidispersi, dan

kisaran morfologi CNC yang bersumber secara alami sangat bervariasi; kami akan lebih menyederhanakan kamikomposit menjadi tiga kelas utama.

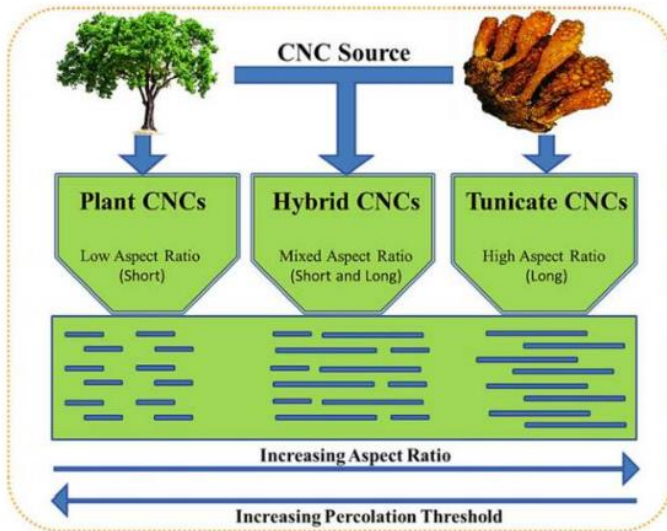
- I. Tanaman dengan rasio aspek rendah nanokomposit polimer berbasis
- II. CNC Rasio aspek tinggi tunikata nanokomposit polimer berbasis CNC
- III. Campuran CNC hibrid dalam nanokomposit polimer

Sepanjang literatur, peneliti telah menggunakan rasio aspek rendah CNC dari sumber nabati untuk menyiapkan nanokomposit polimer. Namun karena sifat sumber selulosa nabati, proses isolasi CNC, dan teknik karakterisasi; CNC ini mencakup berbagai distribusi rasio aspek, berbagai bentuk penampang, mengubah rasio

selulosa I α untuk sayap dan seterusnya. Demikian juga, untuk tunikata rasio aspek tinggi, berbagai morfologi dilaporkan di seluruh literatur dan ini bervariasi untuk alasan yang sama seperti sumber CNC berbasis tanaman. Kami merasa, mengingat variabilitas dalam morfologi CNC di seluruh sumber alami dan inkonsistensi dalam CNC yang digunakan di antara laporan literatur, bahwa masuk akal untuk memisahkan komposit berbasis CNC ke dalam tiga kelas yang disebutkan sebelumnya, divisualisasikan pada Gambar.3. Ini akan memungkinkan untuk perbandingan sederhana antara efek rasio aspek tinggi, rasio aspek rendah dan campuran hybrid CNC rasio aspek tinggi dan rendah, pada sifat mekanik nanokomposit polimer.

4.1 Penguatan Mekanik CNC dalam Nanokomposit Polimer

Penguatan mekanis yang diamati pada nanokomposit polimer yang diperkuat CNC diperkirakan muncul dari dua faktor utama. Faktor pertama dan paling jelas adalah sifat mekanik yang mengesankan yang ditampilkan kristal CNC. Sebanding dengan biaya tinggi, bahan nano penguat sintetis seperti nanotube karbon (Moon et al. 2011), CNC menampilkan modulus Young dari 110 hingga 220 GPa dan kekuatan Tarik



Gambar 3 Memvisualisasikan penggabungan CNC turunan tunikata rasio aspek tinggi panjang, CNC turunan tanaman rasio aspek rendah pendek dan campuran hybrid CNC rasio aspek tinggi dan rendah (panjang dan pendek) dalam nanokomposit polimer

dalam kisaran 7,5-7,7 GPa (Lin et al. 2012). Faktor kedua berkaitan dengan transfer tegangan antara matriks polimer dan pengisi CNC. Interaksi yang kuat antara matriks dan pengisi seperti ikatan kovalen atau interaksi nonkovalen seperti ikatan hidrogen memungkinkan tegangan ditransfer dari matriks polimer viskoelastik ke tulangan CNC elastis. Semakin lemah interaksi antara

matriks dan pengisi, semakin lemah transfer tegangan dari matriks ke pengisi, yang menyebabkan berkurangnya penguatan dan semakin rendah sifat mekanik nanokomposit (Kargarzadeh et al.2017) (Dunlop dkk. 2019). Faktor pertama mengenai sifat mekanik CNC individu yang luar biasa sebagian besar konsisten terlepas dari sumber CNC atau kondisi pemrosesan. Namun, peningkatan variabilitas diamati ketika transfer stres dipertimbangkan. Transfer tegangan dapat bervariasi dengan banyak faktor seperti kimia permukaan pengisi dan matriks, metodologi persiapan nanokomposit, keberadaan plasticizer atau pelarut, agregasi CNC dan morfologi CNC antara lain (Klemm et al. 2011). Singkatnya, setiap faktor yang memodifikasi pembentukan atau struktur akhir dari jaringan CNC perkolasi dalam matriks polimer akan mempengaruhi sifat mekanik dari nanokomposit yang dihasilkan (Dufresne et al.2000, Dufresne 2008). Ketika menyesuaikan sifat mekanik yang ditentukan secara

eksperimental dengan sifat mekanik yang diharapkan, dua model umum paling sering digunakan: model perkolasi (Takayanag dkk. 1964) dan model Halpin-Kardos (Halpin dan Kardos 1972). Model perkolasi memprediksi modulus bahan nanokomposit dengan mengasumsikan bahwa matriks polimer terlalu lunak untuk berkontribusi pada modulus nanokomposit, yang sebaliknya didominasi oleh jaringan yang saling berhubungan atau 'perkolasi' dari bahan pengisi kaku yang memiliki urutan dan struktur kontinu di seluruh nanokomposit yang berasal dari interaksi pengisi-pengisi yang kuat. Sebaliknya model Halpin-Kardos mengasumsikan distribusi pengisi yang sempurna di dalam polimer matriks tanpa interaksi pengisi-pengisi yang ada. Kedua model bergantung pada rasio aspek rata-rata (panjang/lebar) dari CNC. Prediksi model perkolasi khususnya sangat bergantung pada rasio aspek bahan pengisi CNC, 2011). Ilustrasi pengaruh rasio aspek CNC pada sifat nanokomposit diilustrasikan oleh karya

(Azizi Samir et al.2005). Dalam penelitian ini tiga jenis CNC didispersikan dalam matriks polimer poli(S-co-BuA) untuk menghasilkan bahan nanokomposit. Nanokomposit yang diperkuat dengan rasio aspek tinggi (~67) CNC tunikata menunjukkan peningkatan modulus dan stabilitas termal terbesar dibandingkan dengan matriks polimer rami. CNC yang bersumber dari bakteri dengan rasio aspek (~60) menunjukkan peningkatan modulus dan termal terbesar kedua, diikuti oleh rasio aspek yang rendah (~10) dari CNC yang bersumber dari tanaman. Khususnya, aspek ketergantungan rasio ambang perkolasi untuk batang kaku seperti tulangan dalam matriks polimer telah ditunjukkan untuk memperluas berbagai bahan pengisi kaku seperti nanotube karbon (Wong et al.2009) dan lainlain (Jiang et al. 2007). Pada bagian ini pengaruh morfologi CNC diselidiki yang berkaitan dengan sifat mekanik CNC yang mengandung nanokomposit polimer.

4.2 Nanokomposit Berdasarkan CNC Bersumber Tanaman

CNC bersumber tanaman pendek, rasio aspek umumnya rendah, kristal yang mengandung campuran selulosa α dan aku β struktur kristal. Tumbuhan tingkat tinggi cenderung menunjukkan derajat selulosa I . yang lebih tinggi β allomorph sedangkan tumbuhan tingkat rendah mengandung lebih banyak selulosa I α alomorf. Ada sejumlah besar laporan dan ulasan tentang berbagai aspek nanokomposit polimer berbasis CNC tanaman (Moon et al.2011; Kim dkk.2015; Oksman dan Sain 2005). Hal ini terutama disebabkan oleh prevalensi, biaya rendah, dan ketersediaan komersial dari CNC yang bersumber dari tanaman dibandingkan dengan sumber lain. Seperti semua komposit nanopolimer yang diperkuat dengan CNC, perilaku temamekanis bahan ini bergantung pada rasio aspek dari CNC, namun sumber

tanaman dari CNC umumnya menunjukkan ukuran yang sempit dan rendah. distribusi rasio aspek (de Rodriguez et al.2006). Baru-baru ini Hendren dkk. menggabungkan CNC turunan kayu dengan poli (5-triethoxysilyl-2-norbornene) (PTESN) untuk membentuk film cor pelarut nanokomposit (Hendren et al.2019). Ketika sifat-sifat mekanik film diselidiki, ditemukan bahwa modulus Young dan modulus penyimpanan meningkat seiring dengan meningkatnya beban CNC. Pada penambahan 20% CNC, modulus Young hampir dua kali lipat dari 540 menjadi 970MPa dan modulus penyimpanan meningkat tiga kali lipat dari 400 menjadi 1200MPa. Di lain baru-baru ini studi, (Chen et al. 2019) membandingkan film bionanokomposit berbasis pati yang menggabungkan nanoselulosa yang diisolasi dari beberapa serat non kayu yang berbeda. Dari berbagai bahan nanoselulosa yang diuji, nanoselulosa yang bersumber dari bambu menunjukkan penguatan terbaik pada kandungan pengisi terendah. Ini terutama dianggap berasal dari

rasio aspek nanoselulosa yang bersumber dari bambu menjadi yang tertinggi dari semua nanoselulosa yang dipelajari. Dalam upaya untuk lebih meningkatkan sifat mekanik nanokomposit polimer yang mengandung CNC bersumber tanaman, beberapa penulis telah mulai memasukkan dispersan polimer ke dalam bahan komposit ini dalam upaya untuk membatasi agregasi CNC dan meningkatkan transfer tegangan antara matriks polimer dan tulangan CNC (Meesorn et al. .2017). It has been demonstrated for poly (ethylene oxide-co-epichlorohydrin), polyurethane and poly(methyl acrylate) matrices, that by using polyvinyl alcohol as a polymeric dispersant for CNCs, significant improvements in mechanical properties are achievable (Meesorn et al. 2017) (Miri et al. 2016). This is thought to arise from improved dispersion and reduced aggregation of the CNC filler material. By taking advantage of the hydrophilic nature of the polyvinyl alcohol and CNCs, (Meesorn et al. 2019) mampu membuat polimer nanokomposit dari poli

(etilen oksida-co-epiklorohidrin), polivinil alkohol dan CNC yang menunjukkan sifat mekanik yang dapat diatur dengan tingkat kelembaban. Saat kering, matriks polimer menampilkan modulus penyimpanan 2,7 MPa, naik menjadi 50 MPa saat diperkuat dengan 10% berat. pabrik CNC. Menariknya ketika 5% berat. polivinil alkohol ditambahkan ke sistem nanokomposit yang sama, modulus penyimpanan yang dihasilkan adalah 200 MPa, empat kali lebih tinggi daripada tanpa CNC dan hampir 75 kali lebih tinggi dari matriks polimer yang tidak dimodifikasi. Khususnya, modulus Young dan kekuatan tarik juga meningkat ketika polivinil ditambahkan sebagai dispersan polimer. Ketika basah tren serupa diamati namun modulus penyimpanan secara signifikan lebih rendah,2010).

4.3 Nanokomposit Berdasarkan CNC Bersumber Tunicate

CNC bersumber Tunicate adalah kristal rasio aspek tinggi panjang yang hampir seluruhnya terdiri dari selulosa I. Studi pertama nanokomposit polimer yang terdiri dari CNC tunicata dilaporkan oleh (Favier et al. 1995) yang menggabungkan kristal nano ini dengan lateks polimer. Hal ini menghasilkan bahan nanokomposit dengan peningkatan sifat mekanik pada konten CNC rendah, terutama ketika nanokomposit dipanaskan di luar suhu transisi gelas dari matriks polimer. Peningkatan sifat mekanik juga didokumentasikan untuk sistem komposit yang terdiri dari poli(-hydroxyoctanoate) dan CNC turunan tunicata, penguatan yang didokumentasikan oleh (Dubief et al. 1999) dihasilkan dari pembentukan jaringan kaku dari bahan pengisi CNC dengan rasio aspek tinggi. Dengan menggabungkan salah satu dari matriks hidrofobik poli(stirena-kobutadiena) atau polibutadiena

dengan CNC turunan tunikata hidrofilik, Dagnon et al. mampu menyiapkan nanokomposit polimer biomimetik dan stimulus yang responsif (Dagnon et al.2012). Pada 17% volume CNC tunicata meningkatkan modulus penyimpanan nanokomposit tiga kali lipat dibandingkan dengan matriks polimer rapi. Di atas transisi kaca, peningkatan mekanis dalam modulus penyimpanan serupa dengan hasil Favier et al., di mana CNC bertindak sebagai stabilisator kaku untuk matriks polimer keadaan kaca. Para penulis mencatat bahwa bahkan ketika bengkak di media berair, penguatan termekanis yang diilhami CNC ke nanokomposit polimer dipertahankan, namun sifat mekanik keseluruhan dari semua sampel berkurang. Ini ditentukan sebagai hasil dari CNC tunikata yang bertindak sebagai saluran hidrofilik yang membantu penyerapan molekul air yang melarutkan CNC dan membatasi transfer tegangannya ke matriks polimer sambil mengurangi kekuatan interaksi pengisi-pengisi CNC. Temuan ini dibangun oleh (Jorfi et al.2013) yang

menyiapkan nanokomposit polimer yang responsif secara fisiologis dan adaptif secara mekanis untuk penggunaan akhirnya dalam aplikasi biomedis.

4.4 Nanokomposit Hibrida terdiri dari Beberapa Sumber CNC

Dalam beberapa tahun terakhir, produksi bahan nanokomposit polimer hibrida, yang menggabungkan beberapa bahan pengisi skala nano dalam matriks polimer yang sama, telah mendapatkan minat yang signifikan. Sifat-sifat nanokomposit polimer hibrid terutama bergantung pada polimer dan pengisi skala nano yang digunakan. Menariknya, telah ditunjukkan bahwa bahan nanokomposit polimerik hibrida yang memanfaatkan pengisi skala nano dari morfologi yang berbeda, sering menunjukkan sifat mekanik yang melebihi nanokomposit monofiller pada tingkat pemuatan pengisi yang sama (Sapkota et al. 2017, Yeng

dkk. 2011, El Miri dkk.2016). Hal ini menunjukkan bahwa ada interaksi kooperatif antara pengisi nano dari morfologi yang berbeda, yang mengarah pada sifat yang ditingkatkan ini. Di sini kita akan membahas nanokomposit polimer hibrida dalam konteks batang yang sangat elastis seperti bahan nano dengan rasio aspek yang berbeda (CNC panjang dan pendek), yang digunakan untuk memberikan penguatan dalam matriks polimer lunak. Ada tubuh kecil tapi berkembang pekerjaan di daerah ini yang menyoroti potensi pertumbuhan, dan keuntungan unik, menggunakan batang panjang dan pendek seperti nanomaterials dalam matriks polimer umum.

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, banyak peneliti telah melaporkan bahan nanokomposit polimer yang mengandung CNC bersumber tanaman atau sumber tunikata (Meesorn et al. 2017, Samir dkk. 2005). Di seluruh laporan ini, perbedaan morfologi (rasio aspek)

dari tulangan CNC terutama dikreditkan dengan perbedaan sifat mekanik yang diamati antara bahan nanokomposit diperkuat dengan CNC dari morfologi yang berbeda tetapi fraksi volume yang sama (Jorfi et al.2013). Rasio aspek besar dari CNC tunikata memungkinkan mereka meresap dan membentuk jaringan yang saling berhubungan dalam matriks polimer pada konsentrasi yang lebih rendah daripada CNC dengan rasio aspek yang lebih rendah. Struktur dan orientasi jaringan perkolasi ini menentukan sebagian besar transfer tegangan antara matriks polimer lunak dan bahan pengisi penguat bergerigi (Šturcová et al.2005). Perkolasi ini jaringan diketahui mengubah struktur dan orientasinya berdasarkan morfologi bahan pengisi. Menggunakan teknik spektroskopi Raman, (Rusli et al.2011) menunjukkan bahwa transfer tegangan yang ditingkatkan dari pengisi CNC ke matriks polimer epoksi diamati untuk tunicateCNC dibandingkan denganCNC kayu. Penulis menghubungkan perbedaan transfer

tegangan ini dengan perubahan morfologi tulangan CNC. Sebuah studi perintis 2011 oleh (Yeng et al. 2011) menggabungkan lembaran graphene skala nano dan nanotube karbon dalam resin epoksi. Anehnya, penulis menemukan bahwa kombinasi hibrida dari dua bahan pengisi yang menampilkan morfologi yang sangat berbeda menunjukkan efek penguatan sinergis dalam epoksi. Kekuatan tarik dari nanokomposit hibrida meningkat lebih dari 35% dibandingkan dengan epoksi yang rapi, sedangkan graphene monofiller yang mengandung nanokomposit menunjukkan peningkatan sekitar 1% dalam kekuatan Tarik.

Membangun studi ini, (El Miri et al. 2016) disiapkan berbasis alkohol polivinil bahan nanokomposit yang menggabungkan kombinasi hibrida dari CNC bersumber tanaman dan nanosheets graphene oxide. Para penulis menemukan perilaku sinergis antara dua bahan pengisi skala nano dalam matriks polimer polivinil alkohol. Hal ini

menghasilkan peningkatan kinerja mekanik untuk bahan multifiller hibrida dibandingkan dengan matriks polimer rapi atau nanokomposit monofiller dengan fraksi volume penguat yang sama. Modulus Young dan kekuatan tarik utama dari nanokomposit hibrida masing-masing meningkat 320% dan 124% dibandingkan dengan matriks polimer rapi; nanokomposit monofiller yang diperkuat CNC hanya meningkat masing-masing sebesar 77% dan 12%.

Studi awal yang menggabungkan pabrik dengan rasio aspek rendah dan rasio aspek tinggi dari CNC bersumber tunikata bersama-sama dalam matriks polimer yang sama dilakukan oleh (Sapkota et al. 2017). Mereka melaporkan ketergantungan rasio aspek pada ambang perkolasi dan mengusulkan model perkolasi yang dimodifikasi, berdasarkan distribusi rasio aspek dari bahan sumber CNC, untuk memprediksi kinerja mekanik eksperimental untuk kelas nanokomposit polimer hibrid

ini. Selain itu penulis mencatat bahwa modulus eksperimental bahan nanokomposit polimer sangat berbobot terhadap kontribusi bahan pengisi rasio aspek tinggi dengan sedikit efek dari bahan pengisi rasio aspek rendah. Baru-baru ini, kelompok kami membangun penelitian oleh (Sapkota et al.2017) dan (El Miri et al. 2016) dan bahan nanokomposit polimer yang disiapkan dengan CNC turunan tanaman dan tunikata yang tergabung dalam matriks polivinil alkohol. Kami menemukan bahwa CNC turunan tunikata tidak hanya menampilkan penguatan yang lebih tinggi daripada CNC pabrik, tetapi ketika pengisi CNC rasio aspek tinggi dan rendah digabungkan dalam rasio 1:1, mereka menampilkan perilaku kooperatif sehubungan dengan modulus elastisitas nanokomposit. Kami menentukan bahwa campuran CNC hibrida menampilkan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada tanaman atau nanokomposit monofiller yang mengandung tunikata, pada konten pengisi yang sama (Dunlop et al. 2019). Ini

dikaitkan dengan amodifikasi jaringan perkolasi yang menghasilkan peningkatan transfer tegangan ke matriks polimer, yang didukung oleh peningkatan urutan struktural bahan nanokomposit seperti yang diungkapkan oleh difraksi sinar-X.

5 Pengaruh Morfologi pada Kinerja Mekanik

Umumnya, ketika membahas morfologi CNC peneliti melaporkan panjang rata-rata, lebar dan rasio aspek berdasarkan beberapa bentuk analisis statistik, biasanya berasal dari mikrograf eksperimental. Penting untuk dipertimbangkan ketika membahas ketergantungan rasio aspek dari penguatan yang diberikan CNC dalam nanokomposit polimer, bahwa rasio aspek CNC yang dilaporkan dalam literatur adalah rata-rata dengan polidispersitas yang sesuai. Menariknya, ketika membandingkan sumber CNC, polidispersitas CNC

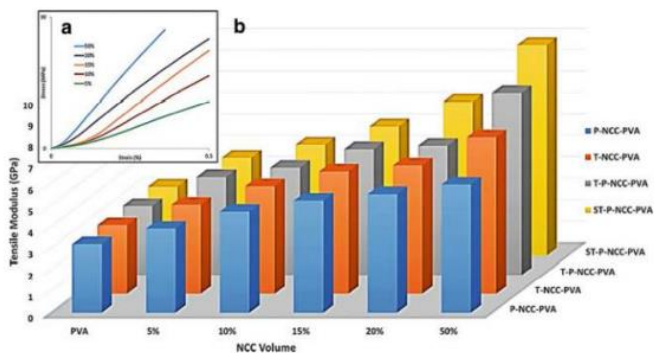
tampaknya berskala dengan rasio aspek rata-rata dari CNC (Azizi Samir et al. 2005) (Natarajan dkk. 2018).

Saat ini, konsensusnya adalah bahwa rasio aspek CNC yang lebih tinggi yang mengarah pada peningkatan transfer stres dalam nanokomposit polimer (Azizi Samir et al. 2005; Sapkota dkk.2017). Untuk alasan ini, CNC tunikata terbukti membawa tekanan ke tingkat yang lebih besar daripada CNC pabrik aspek rendah oleh (Šturcová et al.2005; Rusli dkk. 2011). Namun perlu dicatat bahwa CNC tunikata juga secara signifikan lebih polidisersi daripada CNC yang bersumber dari tanaman (de Souza Lima et al.2004).

Sejauh pengetahuan kami, dalam literatur saat ini, rasioCNCaspect umumnya dianggap sebagai faktor utama dalam penguatan matriks polimer yang diharapkan (Azizi Samir et al. 2005; de Souza Lima dkk.2004; Sapkota dkk.2017). Namun baru-baru ini, nanokomposit CNC hibrid telah menunjukkan sifat

mekanik yang sangat tinggi, bahkan melebihi tulangan CNC turunan tunikata pada konten CNC yang sama (Gbr. 1).4).

Rasio aspek rata-rata dari campuran CNC hibrida lebih rendah daripada CNC tunikata, namun sebagai pengisi, CNC hibrida menunjukkan sifat mekanik yang unggul daripada



Gambar 4 Tegangan DMA versus hamparan regangan nanokomposit hibrid untuk meningkatkan konten CNC **Sebuah**), dan **b**) mengukur modulus Young untuk semua komposit termasuk monofiller P-NCC-PVA dan T-NCC-PVA serta hibrida TP-NCC-PVA dan ST-P-NCC-PVA

CNC tunicata monofiler. Hasil yang tidak biasa untuk bahan nanokomposit hibrida ini berpotensi dapat

dijelaskan oleh peningkatan polidispersitas CNCs dalam kasus nanokomposit hibrida, daripada hanya mempertimbangkan rasio aspek rata-rata dari penguat CNC multifiller. Studi lebih rinci yang menyelidiki penggunaan penguat CNC multifiller hibrida polidispersi tinggi dalam komposit polimer diperlukan untuk lebih memahami sifat mekanik unik yang ditunjukkan oleh bahan-bahan ini. Pekerjaan di masa depan di bidang ini akan lebih menjelaskan apakah penguatan CNC dalam komposit polimer sebagian bergantung pada polidispersitas atau terutama bergantung pada rasio aspek pengisi CNC.

6 Kesimpulan dan Perspektif Masa Depan

Jelas ada minat yang kuat dan berkembang dalam penggunaan CNC untuk memodifikasi sifat matriks polimer. Di antara yang paling penting adalah efek dari CNCs pada sifat mekanik dari bahan nanokomposit

polimer yang sesuai. CNC dari sumber mana pun dengan morfologi apa pun memiliki potensi untuk memperkuat matriks polimer, asalkan CNC dan polimer berbagi kimia permukaan yang kompatibel dan modulus elastisitas polimer lebih rendah daripada CNC. Telah ditunjukkan bahwa CNC rasio aspek tinggi, seperti yang bersumber dari tunikata; memperkuat polimer pada konsentrasi CNC yang lebih rendah daripada CNC rasio aspek rendah seperti yang bersumber dari tanaman. Ketika CNC tanaman dan tunikata digabungkan dalam matriks polimer yang sama, nanokomposit polimer hibrid yang dihasilkan dapat menampilkan sifat mekanik yang lebih baik daripada CNC tanaman atau tunikata yang tersebar secara individual di dalam matriks polimer. Temuan ini mempertanyakan gagasan bahwa rasio aspek CNC adalah faktor morfologi utama ketika menentukan penguatan CNC dalam matriks polimer. Kami berpendapat bahwa polidispersitas dari penguatan CNC mungkin juga memainkan faktor penting, dan berharap

bahwa pekerjaan di masa depan untuk memahami efek morfologi CNC pada sifat mekanik komposit polimer monofiller dan hybrid multifiller akan dieksplorasi.

Referensi

Araki J, Wada M, Kuga S (2001) Steric stabilization of a cellulose microcrystal suspension by poly (ethylene glycol) grafting. *Langmuir* 17(1):21–27

Azizi Samir MAS, Alloin F, Dufresne A (2005) Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules* 6(2):612–626

Beck-Candanedo S, Roman M, Gray DG (2005) Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions. *Biomacromolecules* 6(2):1048–1054

Berrill NJ (1950) *The Tunicata*. The Ray Society, London

Brown EE, Laborie M-P (2007) Bioengineering bacterial cellulose/poly (ethylene oxide) nanocomposites. *Biomacromol* 8(10):3074–3081

Chauve G, Bras J (2014) Industrial point of view of nanocellulose materials and their possible applications. In: *Handbook of green materials: 1 Bionanomaterials: separation processes, characterization and properties*, pp 233–252

Chen G et al. (2018) Scale-up of production of bacterial nanocellulose using submerged cultivation. *J Chem Technol Biotechnol* 93(12):3418–3427

Chen Q, Liu Y, Chen G (2019) A comparative study on the starch-based biocomposite films reinforced by nanocellulose prepared from different non-wood fibers. *Cellulose* 26(4):2425–2435

Ciolacu D, Popa VI (2011) Cellulose allomorphs: structure, accessibility and reactivity. *Environ Eng Manage J* 10(3):467–468

Dagnon KL et al. (2012) Water-triggered modulus changes of cellulose nanofiber nanocomposites with hydrophobic polymer matrices. *Macromolecules* 45(11):4707–4715

de Menezes AJ et al. (2009) Extrusion and characterization of functionalized cellulose whiskers reinforced polyethylene nanocomposites. *Polymer* 50(19):4552–4563

de Rodriguez NLG, Thielemans W, Dufresne A (2006) Sisal cellulose whiskers reinforced polyvinyl acetate nanocomposites. *Cellulose* 13(3):261–270

de Souza Lima MM, Redouane B (2004) Rodlike cellulose microcrystals: structure, properties, and applications. *Macromol Rapid Commun* 25(7):771–787

Dehal P et al. (2002) The draft genome of *Ciona intestinalis*: insights into chordate and vertebrate origins. *Science* 298(5601):2157–2167

Dubief D, Samain E, Dufresne A (1999) Polysaccharide microcrystals reinforced amorphous poly (β -hydroxyoctanoate) nanocomposite materials. *Macromolecules* 32(18):5765–5771

Dufresne A, Dupeyre D, Vignon MR (2000) Cellulose microfibrils from potato tuber cells: processing and characterization of starch–cellulose microfibril composites. *J Appl Polym Sci* 76(14):2080–2092

Dufresne A (2008) Polysaccharide nanocrystal reinforced nanocomposites. *Can J Chem* 86(6):484– 494

Dunlop MJ, Acharya B, Bissessur R (2018) Isolation of nanocrystalline cellulose from tunicates. *J Environ Chem Eng* 6(4):4408–4412

Dunlop MJ, Acharya B, Bissessur R (2019) Study of plant and tunicate based nanocrystalline cellulose in hybrid polymeric nanocomposites. *Cellulose* 1–13

El Achaby M et al. (2018) Reuse of red algae waste for the production of cellulose nanocrystals and its application in polymer nanocomposites. *Int J Biol Macromol* 106:681–691

El Miri N, El Achaby M, Fihri A, Larzek M, Zahouily M, Abdelouahdi K, Barakat A, Solhy A (2016) Synergistic effect of cellulose nanocrystals/graphene oxide nanosheets as functional hybrid nanofiller for enhancing properties of PVA nanocomposites. *Carbohydr Polym* 137:239–248

Elazzouzi-Hafraoui S et al. (2007) The shape and size distribution of crystalline nanoparticles prepared by acid hydrolysis of native cellulose. *Biomacromolecules* 9.1:57–65

Endes C et al (2016) A critical review of the current knowledge regarding the biological impact of nanocellulose. *J Nanobiotechnol* 14(1):78

Favier V, Chanzy H, Cavaille JY (1995) Polymer nanocomposites reinforced by cellulose whiskers. *Macromolecules* 28(18):6365–6367

Frost & Sullivan—Market Research (2016) Emerging applications of nanocellulose technology. In: Sustainable, bio-based nanomaterials, nanofibrillated cellulose (NFC), nanocrystalline cellulose (NCC) and bacterial nanocellulose (BNC) to expand application base. Release date 09-may-2016. Region global. Research code: D6DF-01-00-00-00SKU: CM01226-GL-TR_18536

George J, Bawa AS (2010) Synthesis and characterization of bacterial cellulose nanocrystals and their PVA nanocomposites. *Adv Mater Res* 123. Trans Tech Publications

George J (2012) High performance edible nanocomposite films containing bacterial cellulose nanocrystals. *Carbohydr Polym* 87(3):2031–2037

Habibi Y, Dufresne A (2008) Highly filled bionanocomposites from functionalized polysaccharide nanocrystals. *Biomacromol* 9(7):1974–1980

Habibi Y, Lucia LA, Rojas OJ (2010) Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. *Chem Rev* 110(6):3479–3500

BAB 5 3D PRINTING

Dalam beberapa tahun terakhir, ada permintaan konstan dari beberapa bidang industri untuk menggunakan komponen ringan untuk menunjukkan kinerja mekanik yang tinggi. Permintaan ini dipenuhi dengan menggunakan bahan komposit, terutama komposit polimer yang diperkuat serat. Dibandingkan dengan kompleksitas bentuk proses konvensional, kepadatan pengisi, dan waktu tunggu manufaktur tidak lagi menjadi penghalang dengan manufaktur aditif. Oleh karena itu, fabrikasi komposit polimer yang diperkuat serat ringan menggunakan manufaktur aditif tetap menjadi yang utama. Dalam bab ini berbagai jenis komposit penguat serat yang dikembangkan dengan menggunakan teknik pembuatan aditif yang berbeda diklasifikasikan berdasarkan panjang serat, rasio aspek, orientasi dan

kinerja yaitu komposit yang diperkuat serat pendek, panjang dan kontinu. Selanjutnya jenis continuous natural fiber reinforced composites yang dikembangkan menggunakan berbagai teknik additive manufacturing seperti fused deposition modeling (FDM) atau Fused Filament Fabrication (FFF), stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), dan Direct Ink Writing (DIW) ditinjau dan didiskusikan. Selain itu, bahan yang berbeda, kekurangan, dan kekuatan yang terkait dengan proses pembuatan aditif yang berbeda dirinci. Beberapa contoh juga disajikan dalam bab ini adalah komponen struktural 3DPrinted memiliki aplikasi real time sendiri di berbagai sektor manufaktur yaitu otomotif, dirgantara dan penerbangan. sintering laser selektif (SLS), peleburan laser selektif (SLM), dan penulisan tinta langsung (DIW) ditinjau dan dibahas. Selain itu, bahan yang berbeda, kekurangan, dan kekuatan yang terkait dengan proses pembuatan aditif yang berbeda dirinci. Beberapa contoh

juga disajikan dalam bab ini adalah komponen struktural 3DPrinted memiliki aplikasi real time sendiri di berbagai sektor manufaktur yaitu otomotif, dirgantara dan penerbangan. sintering laser selektif (SLS), peleburan laser selektif (SLM), dan penulisan tinta langsung (DIW) ditinjau dan dibahas. Selain itu, bahan yang berbeda, kekurangan, dan kekuatan yang terkait dengan proses pembuatan aditif yang berbeda dirinci. Beberapa contoh juga disajikan dalam bab ini adalah komponen struktural 3DPrinted memiliki aplikasi real time sendiri di berbagai sektor manufaktur yaitu otomotif, dirgantara dan penerbangan.

1. Pendahuluan

Continuous Natural Fiber (CNF) dan biokompositnya digunakan secara luas di hampir semua aplikasi struktural karena karakteristik alaminya yang masif seperti kepadatan yang lebih rendah, biaya yang lebih

rendah, dan dapat diperbarui serta dapat terurai secara hayati dengan lingkungan (Pickering et al. 2016). Komposit “Hijau”, berdasarkan serat alami yang berasal dari tanaman dan resin yang dapat terurai secara hayati, sangat diminati untuk memenuhi persyaratan peraturan daur ulang. Beberapa peneliti menegaskan bahwa komposit serat alami yang berkelanjutan menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kekakuan, kekuatan dan ketangguhan komposit dibandingkan komposit yang diperkuat serat, yang cenderung digunakan dalam aplikasi teknologi tinggi di berbagai sektor teknik seperti otomotif, kedirgantaraan, pertahanan dll. Namun, sifat komposit CNF tergantung pada berbagai faktor sifat intrinsik matriks, sifat serat, fraksi volume serat, dan kekuatan ikatan antarmuka antara serat dan matriks, rasio aspek serat serta orientasi serat (Ranganathan et al.2015).

Dalam beberapa dekade terakhir, komposit berbasis CNF telah dikembangkan melalui berbagai proses manufaktur seperti pembentukan vakum (Delvasto et al. 2010), ekstrusi (Grande dan Torres 2005), cetakan injeksi (Gao dan Mäder 2006), dan kompresi (Sreekumar et al. 2007). Metode fabrikasi konvensional untuk komposit ini memerlukan fasilitas dan peralatan yang mahal, seperti autoklaf dan cetakan kaku yang kompleks, sehingga menghambat aplikasi yang luas. Mereka juga dibatasi dan dibatasi oleh struktur kompleksitas, biaya cetakan yang tinggi, orientasi, dan keselarasan serat (Mohanty et al.2004; Kebaikan dkk.2015; Faruk dkk.2012). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, metode baru yaitu teknologi 3D Printing/Additive untuk komposit yang diperkuat serat terus menerus sedang dikembangkan dan dipelajari oleh banyak peneliti. Teknik pencetakan 3D adalah salah satu proses paling menjanjikan yang meningkatkan pendekatan pemrosesan yang ringan dan berbiaya rendah untuk biokomposit yang diperkuat jika

dibandingkan dengan beberapa metode fabrikasi komposit lainnya (Compton dan Lewis 2014). Penelitian yang melibatkan manufaktur aditif untuk mengembangkan komponen struktural menggunakan komposit serat alami berkelanjutan masih dalam tahap muda dan berkembang secara eksponensial di seluruh dunia. Beberapa teknik manufaktur aditif sedang terlibat untuk pengembangan komponen struktural yang meliputi fused deposition modeling (FDM) atau Fused Filament Fabrication (FFF), stereolithography (SLA), binder jetting (BJ), multi-jet fusion (MJF), laser selektif sintering (SLS), peleburan laser selektif (SLM), peleburan berkas elektron (EBM), manufaktur aditif berkas elektron (EBAM), manufaktur aditif area besar (BAAM) (Dugbenoo et al. 2018); Dari mana teknologi FDM/FFF, SLA dan SLS digunakan untuk mengembangkan komposit polimer.

Bab ini menyajikan tinjauan rinci tentang jenis serat alami dan teknik pencetakan 3D yang diadopsi oleh para

peneliti untuk pengembangan komponen biokomposit yang diperkuat CNF yang diproduksi aditif. Selain itu, berdasarkan signifikansi teknologi saat ini dan batasannya telah ditentukan.

2 Klasifikasi Alami Serat Biokomposit

Serat alam serat selulosa/lignoselulosa berasal dari tumbuhan, seperti kenaf, rami, rami, rami, jelatang, daun nanas, sisal, kurma, kapuk, sabut kelapa, kapuk, bambu (AlOqila dan Salit 2017; AL-Oqila dan Sapuan2018; TGYDapatkan al.2019). Di sisi lain, wol, sutra, rambut, dan bulu diekstraksi dari sebagian besar protein hewani dan beberapa limbah lain dari sumber daya terbarukan (Saheb dan Jog1999). Serat alam diklasifikasikan sebagai serat pendek, panjang dan kontinu berdasarkan rasio aspek (panjang dan diameter serat) serat, serat ini diperkuat dengan matriks polimer dan membentuk biokomposit. Material biokomposit didefinisikan sebagai

material komposit yang paling sedikit salah satu penyusunnya berasal dari sumber daya alam. Secara garis besar dikategorikan menjadi tiga jenis.

1. Penguatan serat sintetis seperti serat karbon, serat kaca, serat kevlar menjadi bio-matriks seperti PLA, PHA, PHB dll.
2. Penguatan serat alami seperti goni, sabut, serat sisal, dll. dalam polimer sintetis/turunan minyak bumi seperti polietilen (PE), polipropilen (PP), dll
3. Penguatan bio/serat alam seperti goni, sabut, serat sisal dll menjadi biomatriks seperti PLA, PHA, PHB dll.

Secara khusus, biokomposit serat alami termasuk dalam kategori (2) dan (3), yaitu bahan biokomposit yang terbuat dari kombinasi serat alam yang diperkuat dengan polimer turunan minyak bumi atau dengan biopolimer. Secara global, serat selulosa menjadi sangat menarik

untuk pengembangan komposit berbasis bio karena memiliki keunggulan dengan sifat mekanik, kepadatan rendah, manfaat lingkungan, terbarukan, dan ekonomi (Ngo2018). Komposit berbasis bio secara umum diklasifikasikan sebagai komposit serat pendek, panjang dan kontinu. Dalam kasus komposit serat pendek, ukuran rata-rata serat cenderung berkisar di bawah 0,5 inci, sedangkan dalam komposit serat panjang panjang serat biasanya 0,5, 1,0, atau 2,0 inci (Collett dan Campbell2004) dalam kedua kasus yaitu komposit serat pendek dan komposit serat panjang, seratnya terputus-putus. Namun, dalam komposit serat kontinu, serat cenderung kontinu karena sifatnya yang unik. Komposit serat kontinu biasanya memiliki orientasi yang lebih disukai, sedangkan serat diskontinu umumnya memiliki orientasi acak. Oleh karena itu, komposit serat kontinu digunakan di mana kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi diperlukan (tetapi dengan biaya yang lebih tinggi), dan komposit serat diskontinu digunakan di mana biaya

adalah pendorong utama dan kekuatan dan kekakuan kurang penting (Chevali et al.2010); Manfaat dan sifat masing-masing kategori dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1 Manfaat dan sifat-sifatnya dari setiap kategori

Deskripsi	Komposit Serat Pendek	Komposit Serat Panjang	Serat Berkelanjutan Komposit
Pengolahan	Dapat diproses dengan banyak metode cetakan kompresi, Ekstrusi, Tata letak tangan, Cetakan injeksi, Cetakan transfer resin, dan Cetakan lembaran, Manufaktur Aditif	Tidak dapat diproses dengan banyak metode cetakan kompresi, Serat panjang langsung teknik ekstrusi (D-LFT), Lay-up tangan, Cetakan transfer resin, dan Cetakan lembaran	Tidak dapat diproses dengan banyak metode cetakan kompresi, Gulungan filamen, Tangan lay-up, Pultrusion, Cetakan transfer resin dan Manufaktur aditif
Panjang serat	Kurang dari 0.5 Inchi	0,5–2,0 Inchi	Lebih besar dari 2.0 Inchi
Rasio aspek	Rasio aspek lebih rendah (<100), berikan kekuatan sedang, kekakuan atau mulur di bawah beban dan dengan daya tahan yang lebih rendah dibandingkan dengan LFC atau CFC	Rasio aspek yang lebih tinggi sekitar 200–3000 (Chevali dkk. 2010) memberikan serat panjang komposit dengan peningkatan kekuatan, kekakuan atau mulur di bawah beban dan ketahanan leleh yang lebih tinggi dengan minimal kompresi	Rasio aspek yang lebih panjang (Lebih baik)
Ketik dan orientasi	Terputus (Lainnya tersebar secara acak dan berorientasi di seluruh bagian)	Terputus-putus (Tidak lebih acak tersebar dan berorientasi di seluruh bagian)	Lanjutan (lebih disukai orientasi reguler diatur di seluruh bagian)
Mekanis kinerja	Mereka menawarkan lebih rendah kinerja mekanik dibandingkan dengan serat panjang dan kontinu komposit, karenanya dapat digunakan semi-struktural komponen Serat pendek diperkuat polimer adalah dikembangkan untuk mengisi kesenjangan properti antara serat terus menerus laminasi digunakan sebagai struktur utama oleh pesawat dan kedirgantaraan industri dan polimer yang tidak diperkuat digunakan sebagian besar dalam aplikasi bantalan non-beban	Mereka menawarkan lebih rendah kinerja mekanik dibandingkan dengan terus menerus komposit serat, tetapi properti yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposit serat pendek serat panjang jembatan komposit kesenjangan antara serat pendek dan kontinu komposit, menawarkan sifat mekanik yang lebih baik daripada SFC, tetapi pertahankan pemrosesannya kondisi (Phelps 2009)	Mereka memberikan yang ekstrim kinerja mekanis, sehingga menjorok ke memanfaatkan komposit untuk penggantian logam atau untuk aplikasi struktural Serat terus menerus komposit biasanya bahan laminasi di yang individu lapisan, lapisan, atau lamina berorientasi pada arah yang akan meningkatkan kekuatan dalam arah beban utama (Campbell 2010)

3 Komposit Serat Alami Berkelanjutan

Serat alam menjadi alternatif yang lebih disukai dalam komposit polimer yang diperkuat, karena sifat intensif seperti kemampuan terbarukan dan biodegradabilitas; selain itu, mereka juga memiliki sifat tarik yang sangat baik.

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa serat pendek (diskrit atau cincang) yang diekstrusi sebagai satu filamen yang berhasil diintegrasikan dengan bahan matriks dapat diterapkan dalam beberapa teknik AM (Campbell 2010), sedangkan pencetakan serat dan bahan matriks terusmenerus lapis demi lapis telah menyajikan penelitian yang sukses. Pencetakan 3D serat berkelanjutan dimulai sejak 2014. Komposit serat kontinu dalam pencetakan 3D dapat didefinisikan sebagai gulungan serat yang digunakan untuk menyematkan untaian serat yang sangat panjang ke dalam bagian-bagian saat dicetak. Serat-serat ini dalam

pencetakan 3D memberikan kekuatan dan kekakuan yang jauh lebih besar daripada komposit serat pendek/partikulat lainnya. Tian et al., penelitian telah melaporkan bahwa, penggunaan filamen biokomposit mengurangi biaya material dan dampak lingkungan (Tian et al.2017). Beberapa penelitian melaporkan bahwa serat kontinu tersedia dalam berbagai bentuk seperti bundel serat, benang, kain goni atau tikar, dalam hal teknologi manufaktur aditif, serat kontinu digunakan sebagai bundel serat dengan sedikit puntiran. Hanya studi penelitian terbatas telah dilakukan dalam pencetakan 3D komposit diperkuat serat alami yang diterima dari buah-buahan dan tanaman. Meja2 mengungkapkan tentang komposit yang diperkuat serat terus menerus dicetak 3D. Pengembangan komposit menggunakan manufaktur aditif melibatkan penerapan serat setelah nozzle langsung ke pekerjaan cetak menggunakan serat dan matriks. Dalam proses ini, serat diimplementasikan dalam dua cara satu adalah

penggabungan serat 'di dalam nosel' atau menempatkan 'setelah nosel'. Secara umum, kelemahan-kelemahan berikut ini terdapat dalam penerapan komposit yang diperkuat serat kontinyu menggunakan proses pencetakan 3D.

1. Kontrol proses yang sulit karena infiltrasi serat sejajar dengan pencetakan dan penanganan serat.
2. Memiliki tantangan dengan resolusi, permukaan akhir dan dalam mengendalikan antarmuka (atau) ikatan termal antara serat dan matriks.
3. Sifat mekanik inferior dan perilaku anisotropik.

Sebuah studi oleh (Tekinalp et al. 2014). menyoroti tantangan yang terkait dengan Komposit yang diperkuat serat pencetakan 3D dan mengevaluasi potensi bantalan beban dari bagian komposit yang terbuat dari bahan baku serat karbon dan resin ABS. Di sisi lain, mereka memiliki berbagai manfaat seperti kebebasan desain,

kustomisasi massal, minimalisasi limbah dan kemampuan untuk memproduksi struktur yang kompleks, serta prototyping cepat dll.

			teknik	
1	Tebu ampas tebu	Polietilen (PE) Polipropilena (PP) Akrilonitril butadiena stirena (ABS) Asam polilaktat (PLA)	Deposisi menyatu pemodelan (FDM)	Navarrete dkk. (2018)
2	serat rami	Asam polilaktat (PLA)	Deposisi menyatu pemodelan (FDM)	Stoof dkk. (2017)
3	Daur ulang serat kapas	Visijet-SL (Jelas)	Stereolitografi (SLA)	Liu dkk. (2017)
4	Kapak derek hijau serat	Matriks geopolimer	Cetakan injeksi dibuat untuk mensimulasikan 3D (2019) mencetak menggunakan a meja bergetar	Korniejenko dkk.
5	serat rami	Daur ulang polipropilena	Deposisi menyatu pemodelan (FDM)	Milosevic dkk. (2017)
6	serat rami	Asam polilaktat (PLA)	Deposisi menyatu pemodelan (FDM)	Stoof dkk. (2017)
Sl. Tidak	Kontinu serat alami	Matriks polimer	Aditif manufaktur teknik	Penulis/Referensi
1	serat rami	Asam polilaktat (PLA)	Deposisi menyatu pemodelan (FDM)/Fused fabrikasi filamen (FFF)	Duigo dkk. (2019)
2	Goni bengkok serat	Asam polilaktat (PLA)	Deposisi menyatu pemodelan (FDM)	Matsuzaki dkk. (2016)
3	serat kapas	Amilopektin	Memulis tinta langsung Direct (DIW)	Jiang dkk. (2019)

4 Manufaktur Aditif: Komposit Serat Alami Berkelanjutan

Berbagai teknik pencetakan 3D sedang digunakan untuk pengembangan biokomposit penguatan berkelanjutan seperti metode deposisi fusi (FDM), stereolitografi (SLA), sintering laser selektif (SLS) dan jet pengikat (3DP). Untuk aplikasi struktural, di luar teknik ini, FDM, SLS, dan 3DP sebagian besar digunakan untuk fabrikasi CNFRBC (Ngo et al.2018). Teknik pencetakan 3D yang paling banyak digunakan dan metode manufaktur serta tantangan dalam pencetakan 3D biokomposit dibahas di bawah ini.

4.1 Pemodelan Deposisi Fused (FDM) dalam Komposit Bertulang Serat Alami

FDM adalah teknik berbasis nozzle extrusion dimana bahan baku dipasang dalam bentuk spool. Angka1a, b, menunjukkan representasi skematik Fused Deposition

Method (FDM) untuk mengembangkan komposit serat alam kontinyu.

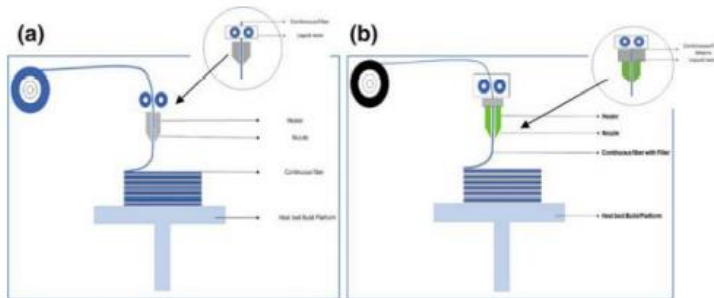
Angka 1a, menunjukkan bahwa bahan baku diumpankan melalui nosel printer dan filamen diekstrusi dari nozzle dengan penerapan panas terkontrol (Turner et al. 2014) dan (Ranganathan et al. 2019). Ekstrudat akan dikirim melalui nosel di bawah suhu leleh yang terkontrol untuk membangun objek dengan penyimpanan selektif; sementara itu, serat alami kontinyu diumpankan dari koil suplai serat dan melewati lubang bagian dalam kepala ekstrusi ke nosel.

Angka 1b, menunjukkan bahwa serat kontinyu direndam dalam matriks cair yang disimpan di bawah gulungan serat. Dalam kedua kasus tersebut, serat alam kontinyu diinfiltrasi dan dilapisi oleh polimer termoplastik cair di dalam nosel, dan komposit yang diresapi dapat diekstrusi keluar dari jalan keluar nosel. Ketika bahan yang diekstrusi mencapai permukaan bagian, bahan tersebut

mengeras dengan cepat dan melekat pada lapisan sebelumnya sehingga serat dapat ditarik keluar secara terus-menerus oleh serat sebelumnya di dalam bagian tersebut. Di sisi lain, kepala ekstrusi, yang terhubung ke mekanisme gerak XY, dapat dan menghasilkan satu lapisan bagian. Setelah satu lapisan selesai, platform bangunan yang ditempatkan pada mekanisme pengangkatan bergerak ke arah sumbu Z dengan peningkatan yang sama dengan ketebalan lapisan. Proses ini diulang sampai bagian selesai (Murphy dan Collins2018) dan (Yang dkk. 2017). Representasi skematis dari proses FDM ditunjukkan pada Gambar.1. FDM adalah metode yang paling banyak digunakan untuk mencetak komposit yang diperkuat serat alami terus menerus.

Berbagai peneliti memanfaatkan proses FDM/FFF untuk mengembangkan biokomposit yang diperkuat serat alami secara berkelanjutan untuk aplikasi struktural.

Upaya



Gambar 1 a Metode FusedDeposition dalam komposit serat alam kontinu dan **b**Metode FusedDeposition dalam komposit serat alam kontinu yang direndam dalam matriks cair

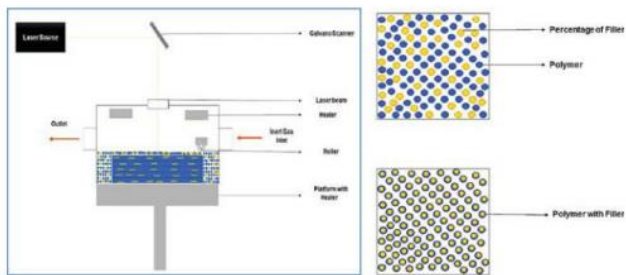
telah mulai mengatasi keterbatasan geometris dan kompleksitas produk. Le Duigou dkk. mengembangkan serat flax kontinu (FF) diperkuat komposit PLA menggunakan proses FDM (Duigou et al.2019). Dalam studi mereka, mereka telah membandingkan dan melaporkan sifat mekanik dan mekanisme kegagalan bagian cFF/PLA tercetak FDM dan komposit polimer yang diperkuat serat sintetis termokompresi terus menerus. Demikian pula, (Duigou et al.2016) juga telah menyelidiki komposit termoplastik yang diperkuat serat kayu yang

diproses terus menerus oleh FDM. Penulis mempelajari perilaku anisotropik serat dengan mencetak dalam orientasi yang berbeda (0 atau 90°). Matsuzaki dkk. juga telah memanfaatkan Proses FDM untuk membuat komposit PLA yang diperkuat serat alami terus menerus (Matsuzaki et al.2016). Dalam studi mereka, mereka telah memeriksa dan membandingkan sifat-sifat mekanis dari biokomposit yang diperkuat secara terus-menerus dengan komposit polimer pencetakan 3D komersial.

4.2 Selektif Laser Sintering (SLS) dalam Komposit Bertulang Serat Alami Berkelanjutan

Proses SLS dioperasikan di bawah prinsip laser sintering yaitu laser intensitas tinggi balok seperti CO₂/Nd: YAG digunakan untuk mensinter partikel bubuk, proses ini juga dikenal sebagai fusi unggun bubuk, ditunjukkan pada Gambar. 2. Penguatan untuk SLSFRPC fabrikasi sebagian besar ditemukan dalam bentuk serat terputus-

putus; serat sintetis yaitu serat karbon, serat kaca atau serat aramid biasanya digunakan. Pada proses ini bahan baku atau matriks polimer akan berbentuk serbuk yaitu partikel sferis poliamida (PA) dan serat sintetis akan memiliki diameter seragam sekitar $10\mu\text{ m}$. Selain PA, beberapa komposit biopolimer lain seperti polikapralakton (PCL)/ hidroksiapatit (HA), PEEK/HA dan polietilen (PE)/HA menggunakan SLS (Wang et al. 2017). Dalam teknik ini kecepatan pemindaian laser, intensitas sumber dan ketebalan lapisan; perlu dioptimalkan untuk pencetakan biokomposit.



Gambar 2. Sintering laser selektif (SLS) untuk komposit yang diperkuat serat alami

elain itu, ruang bangunan harus dijaga dengan atmosfer inert untuk menciptakan lingkungan bebas oksigen yang diperlukan (Goh et al. 2019) dan (Goodridge et al. 2011); sehingga bahan tepung yang digunakan untuk mencetak akan bebas dari kelembaban, sehingga rongga atau cacat pada bagian yang dicetak dapat dihindari.

Saroia dkk. menggunakan proses laser sintering untuk memproduksi komposit poliamida-12 yang diperkuat serat nano karbon. Campuran serat karbon dan poliamida dibuat dengan pencampuran lelehan, dan karakterisasi bagian sinter laser dipelajari (Saroia et al.2020). Salmoria dkk. melaporkan bahwa, pencetakan 3D komposit penguat serat kontinu menggunakan SLS adalah tantangan nyata (Salmoria et al.2011). Para peneliti sedang bekerja untuk pengembangan paradigma yang tepat dan standar untuk pencetakan 3D dari komposit polimer serat berkelanjutan.

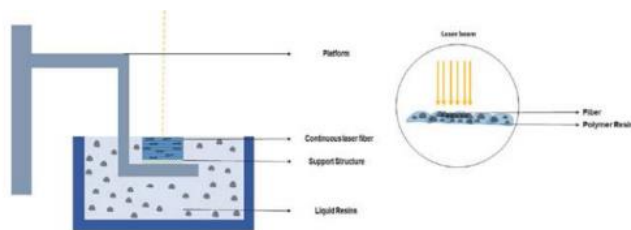
Baru-baru ini, beberapa peneliti telah memanfaatkan biokomposit yang diperkuat secara alami untuk mengembangkan komponen struktural. Mereka melaporkan bahwa, dengan mengoptimalkan parameter proses, proses SLS dapat diadaptasi untuk mengembangkan komposit yang diperkuat serat alami. Zhao dkk. telah mengoptimalkan parameter proses SLS, untuk meningkatkan sifat mekanik biokomposit yang dikembangkan (Zhao et al. 2017). Zeng dkk. mengembangkan komponen biokomposit cetak SLS menggunakan tepung bambu dan ko-poliester (BFCP) untuk berbagai aplikasi industri (Zeng et al. 2013). Demikian juga, Simpson et al. mengembangkan biokomposit menggunakan serbuk kayu sebagai penguat dalam matriks polimer (Simpson 2018). Pengolahan bahan serbuk untuk proses SLS cukup mahal dibandingkan teknik cetak lainnya. Selanjutnya, kesulitan bertahan dengan pembuatan bahan dan mengendalikan orientasi serat, adhesi antarmuka dll Namun,

biokomposit yang dikembangkan menemukan bahan yang ramah lingkungan, tidak beracun, dan biodegradable dengan biaya rendah.

4.3 Stereolithography (SLA) dalam Komposit Serat Alami Berkelanjutan

Fotopolimerisasi tong secara selektif menyembuhkan photopolymer dalam tong menggunakan sinar ultraviolet (UV) dapat disebut sebagai Stereolithography (SLA). Dengan kata lain, stereolitografi (SLA) adalah teknik polimerisasi foto tong yang umum digunakan untuk mencetak FRPC. Proses ini juga dikenal sebagai pemrosesan cahaya langsung (DLP). Dalam proses SLA, laser watt rendah NdYag laser/sumber UV digunakan untuk menyembuhkan resin fotopolimer cair. Platform build terendam ke dalam photopolymers cair dan dipertahankan pada ketinggian satu lapis. Kemudian UV/laser membuat lapisan berikutnya dengan proses

pengawetan dan pepadatan resin fotopolimer secara selektif. Proses ini disebut fotopolimerisasi (Feng et al.2017) dan (Guillaume et al. 2017a). Sebagian besar sistem SLA yang ada menerapkan pendekatan dari bawah ke atas, memindai setiap lapisan, kemudian memindahkan alas ke bawah dan menyeka lapisan polimer tambahan di atas sebelum polimerisasi foto lagi, yang ditunjukkan pada Gambar.3. Seperti yang ditunjukkan pada gambar, platform sistem SLA bergerak ke bawah ke jumlah tambahan, dengan menyimpan lapis demi lapis. Wiper menghaluskan bagian atas resin yang disimpan sebelum laser.



Gambar 3 Proses Stereolithography (SLA)

menyembuhkan derai lapisan yang sesuai. Anyaman tikar serat digabungkan pada lapisan bawah resin padat, dan kemudian dilapisi dengan resin. Fotopolimerisasi tong dapat membuat bagian komposit dari serat yang dipotong, dianyam, atau kontinu. Pembuatan bagian komposit terdiri dari merendam serat penguat dalam resin yang dapat disembuhkan dengan UV, kemudian menyembuhkan resin. Teknik ini memiliki kemampuan untuk mencetak komponen resolusi yang lebih tinggi. Namun, ketersediaan bahan komersial sangat terbatas untuk proses ini. Penelitian telah dilakukan pada FRPC kontinu menggunakan bundel serat kaca dan karbon dan tikar serat karbon sebagai penguat (Karalekas dan Antoniou2004). Dalam pengembangan FRPC berkelanjutan ini menggunakan SLA, manual berbohong atau menggabungkan mekanisme berbaring serat (Goodridge et al.2011).

Baru-baru ini banyak peneliti mencoba mengembangkan biokomposit berkelanjutan baru menggunakan serat alami dalam proses SLA, karena ketersediaan resin cair yang mudah. Guillaume dkk. poli (trimetilen karbonat) (PTMC) dan nano-hidroksiapatit (HA) berbasis struktur berpori 3D sitokompatibel yang dikembangkan menggunakan proses manufaktur SLA (Guillaume et al.2017b). Demikian pula, Garg et al. SLA yang dikembangkan memproses komposit yang diperkuat serat terus menerus menggunakan Accura60 Resin dan serat karbon (Garg et al.2001). Namun, proses fotopolimerisasi tong memiliki beberapa keterbatasan seperti (1) mekanisme penambahan serat, (2) pengendapan serat, (3) pembentukan gelembung (void), (4) peningkatan viskositas resin (menyebabkan pencampuran yang buruk, menyebabkan untuk sifat antarmuka yang buruk, dan (5) difraksi laser dan energi laser.

4.4 Teknologi Penulisan Tinta Langsung dalam Mengembangkan Komposit Bertulang Serat Berkelanjutan

Teknologi Direct Ink Writing (DIW) digunakan untuk mengembangkan komposit termoplastik yang diperkuat serat alami. Dalam teknologi penulisan tinta langsung, empat jarum suntik yang mengandung komposisi bahan magnetik yang berbeda digunakan untuk menghasilkan tinta dengan formulasi yang berbeda, sehingga cetakan multi-bahan dapat dicapai. Untuk menghasilkan tinta komposit, serbuk SRP (amilopektin), air, dan serat kapas, tanpa bahan kimia atau pengikat lainnya digunakan oleh (Jiang et al. 2019). Dalam proses ini komponen ditambahkan dalam perbandingan yang tepat, dicampur dengan baik dan kemudian mengalami perlakuan termal (menyebabkan gelatinisasi), sehingga membentuk pola komposit 3D. Komposit SR dengan serat kapas 10% berat

dari 400 μ m nozzle dan (inset) struktur seluler yang dicetak melalui proses ini dikembangkan dan dipelajari oleh penulis. Demikian pula, sistem penulisan tinta langsung (DIW) juga digunakan oleh Sullivan et al. Dalam studi mereka, mereka telah menggunakan tinta nanopartikel perak dengan sel yang dibuat khusus untuk menghasilkan sistem elektroforesis untuk memungkinkan pengendapan elektroda konduktif dengan ketebalan yang terkontrol dengan pencampuran homogen komposit termit (Sullivan et al.2019).

5 Komponen 3D Printing dalam Aplikasi Struktural

Teknologi pencetakan 3D muncul untuk memenuhi kebutuhan pembuatan prototipe yang cepat di industri. Teknologi ini telah melampaui tujuan yang dimaksudkan dan memiliki potensi untuk aplikasi struktural. Berbagai industri manufaktur telah memanfaatkan kemampuan printer 3D untuk meringankan struktur dengan

mengembangkan struktur kisi menggunakan komposit yang diperkuat serat. Komponen-komponen ini digunakan di berbagai sektor seperti otomotif, kedirgantaraan dan penerbangan. Sebagai contoh

1. MS. AMFG Autonomous Manufacturing Company telah memproduksi panel spacer cetak 3D dan dipasang pada pesawat komersial A320
2. MS. Perusahaan Arsitektur Belanda menggunakan 3DP untuk merancang fasad yang terintegrasi dengan panel surya, di mana sudut panel surya dioptimalkan secara otomatis berdasarkan lokasi. MS. Teknologi Arevo, menggunakan continuous carbon fiber/polyetheretherketone (PEEK) untuk rangka Arevo: “ebike” yang dibantu baterai.
3. MS. Apis Cor adalah perusahaan start-up yang berbasis di San-Francisco telah menggunakan printer 3D konstruksi bergerak yang mencetak

komponen struktural dengan mengadopsi manufaktur aditif, industri konstruksi memiliki beberapa keunggulan seperti kreativitas yang lebih baik, fleksibilitas desain, limbah material yang lebih sedikit, jejak karbon yang lebih rendah, dan struktur yang lebih kuat,

6 Kesimpulan

Dalam bab ini, pengembangan CNF dan biokompositnya untuk aplikasi struktural dengan menggunakan proses manufaktur aditif dibahas. Bab ini dengan jelas menunjukkan jenis serat alam biokomposit yaitu serat pendek, panjang dan kontinu dengan aspek rasio (panjang dan diameter serat) serat dan berbagai jenis serat (serat sintetis, serat alam dan serat alam ditambahkan bio) digunakan sebagai penguat. dengan matriks polimer untuk membentuk biokomposit. Lebih lanjut jenis kontinu komposit yang diperkuat serat alami

yang dikembangkan menggunakan teknik manufaktur aditif yang berbeda dieksplorasi. Selain itu, bab ini juga membahas keuntungan dan kesulitan utama yang terlibat dalam komposit serat alami tercetak dengan menggunakan berbagai proses manufaktur aditif seperti fused deposition modeling (FDM) atau FusedFilament Fabrication (FFF), stereolithography (SLA), sintering laser selektif. (SLS), peleburan laser selektif (SLM), dan penulisan tinta langsung (DIW). Kemampuan untuk mengembangkan komponen struktural menggunakan komposit yang diperkuat serat alam dengan menggunakan proses manufaktur aditif juga dibahas secara rinci.

Referensi

Al-Oqla FM, Salit MS (2017) Materials selection for natural fiber composites. Woodhead Publishing.

AL-Oqla FM, Sapuan SM (2018) Investigating the inherent performance characteristic/deterioration interactions of natural fibers in biocomposites for better utilization of resources. *J Polym Environ* 26(3):1290–1296

Campbell FC (2010) Structural composite materials. ASM international

Compton BG, Lewis JA (2014) 3D-printing of lightweight cellular composites. *Adv Mater* 26(34):5930–5935

Collett GP, Campbell FC (2004) Curcumin induces c-jun N-terminal kinase-dependent apoptosis in HCT116 human colon cancer cells. *Carcinogenesis* 25(11):2183–2189

Chevali VS, Dean DR, Janowski GM (2010) Effect of environmental weathering on flexural creep behavior of long fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polym Degrad Stab* 95(12):2628–2640

Delvasto S, Toro EF, Perdomo F, de Gutiérrez RM (2010) An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Constr Build Mater* 24(2):187–192

Dugbenoo E, Arif MF, Wardle BL, Kumar S (2018) Enhanced bonding via additive manufacturing enabled

surface tailoring of 3D printed continuous-fiber composites. *Adv Eng Mater* 20(12):1800691

Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M (2012) Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci* 37(11):1552–1596

Feng X, Yang Z, Chmely S, Wang Q, Wang S, Xie Y (2017) Lignin-coated cellulose nanocrystal filled methacrylate composites prepared via 3D stereolithography printing: Mechanical reinforcement and thermal stabilization. *Carbohydr Polym* 169:272–281

Gao SL, Mäder E (2006) Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification. *Compos Sci Technol* 66(7–8):952–963

Garg R, Prud'homme RK, Aksay IA, Janas VF, Tenhuisen KS, Huxel ST (2001) U.S. Patent No. 6283997. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Gu

Goodridge RD, Shofner ML, Hague RJ, McClelland M, Schlea MR, Johnson RB, Tuck CJ (2011) Processing of a Polyamide-12/carbon nanofibre composite by laser sintering. *Polym Testing* 30(1):94–100

Goodship VD, Middleton B, Cherrington R (2015) Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3D printing. William Andrew

Grande C, Torres FG (2005) Investigation of fiber organization and damage during single screw extrusion of natural fiber reinforced thermoplastics. *Adv Polym Technol: J Polym Process Inst* 24(2):145–156

uillaume O, Geven MA, Sprecher CM, Stadelmann VA, Grijpma DW, Tang TT, Yuan H (2017) Surface-enrichment with hydroxyapatite nanoparticles in stereolithography-fabricated composite polymer scaffolds promotes bone repair. *Acta Biomater* 54:386–398.

BAB 6 CACAT MANUFAKTUR PADA SERAT ALAMI

Umumnya, cacat kata telah ditentukan sebagai kelainan, ketidaksempurnaan, kekurangan, dan cacat yang merusak kualitas, fungsi atau kegunaan bahan atau sistem. Dalam manufaktur, cacat atau secara khusus disebut cacat manufaktur adalah pengaruh yang sangat signifikan bagi banyak sifat dan kinerja material atau sistem lainnya. Dalam literatur, cacat manufaktur pada komposit yang diperkuat serat alami yang biasanya terjadi selama fabrikasi diklasifikasikan sebagai serat yang tidak selaras, kantong pengikat silang yang tidak terdispersi, resin basah yang buruk, zona kaya resin, dan rongga. Pengetahuan dan penentuan kejadian cacat

manufaktur penting dan membantu peneliti atau produsen meningkatkan kualitas proses fabrikasi bahan dan kinerja bahan. Bab ini membahas cacat manufaktur yang telah dikenali terjadi selama proses pembuatan bahan komposit diperkuat serat alam dengan menggunakan teknik non-destruktif seperti Optical Microscope (OM) dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Kembalinya cacat manufaktur ke bidang internal dan eksternal mendikte dalam banyak hal sifat material dan kinerja produk akhir.

1. Pendahuluan

Untuk mengatasi semua masalah yang diangkat karena lingkungan dan keberlanjutan, abad ini telah menyaksikan pencapaian luar biasa dalam teknologi hijau di bidang ilmu material melalui pengembangan biokomposit dan pengembangan material berkinerja tinggi yang terbuat dari sumber daya alam meningkat. Kedua fakta ini telah dilaporkan oleh

Omar Faruk et al. (2012) seperti dalam artikel ulasan mereka berjudul Biokomposit diperkuat dengan serat alami: 2000–2010. Sifat-sifat serat alam berbeda di antara karya-karya yang dikutip, karena serat yang digunakan berbeda, berbeda pula kondisi kelembaban hadir, dan metode pengujian yang berbeda digunakan. Kinerja komposit polimer yang diperkuat serat alam tergantung pada beberapa faktor, termasuk komposisi kimia serat, dimensi sel, sudut mikrofibril, cacat, struktur, sifat fisik, dan sifat mekanik, dan interaksi serat dengan polimer. Talreja (2015) diterbitkan dalam bab buku mereka yang berjudul Cacat manufaktur pada komposit dan pengaruhnya terhadap kinerja menyatakan bahwa dalam struktur komposit, cacat manufaktur sudah dekat, dan dapat dikurangi tetapi tidak dihilangkan. Selain itu, cacat tergantung pada proses manufaktur dan signifikansinya bervariasi dengan persyaratan kinerja yang diterapkan pada struktur. Oleh karena

itu, dalam pendekatan dan praktik rekayasa yang baik, adalah untuk membiarkan cacat yang tidak membahayakan kinerja keselamatan, produksi yang efisien dan sebagai imbalannya menurunkan biaya produksi. Dalam bab ini, akan membahas cacat manufaktur karena telah diidentifikasi bahwa cacat dan kembalinya cacat ke bidang internal dan eksternal mendikte dalam banyak cara sifat material dan kinerja produk akhir. Cacat juga penting untuk banyak sifat bahan lainnya seperti daya tahan kimia, kerusakan dielektrik, difusi, dan sebagainya. Penentuan cacat juga penting dalam pembuatan bahan komposit karena kejadian cacat ini akan mempengaruhi kinerja dan sifat bahan komposit. Pengetahuan tentang terjadinya cacat juga akan membantu peneliti untuk meningkatkan proses manufaktur selama bekerja pada material komposit.

2 Cacat Manufaktur

Cacat dapat dikategorikan dalam cacat serat, cacat matriks, cacat matriks serat, dan cacat manufaktur. Selama produksi komersial bahan komposit, cacat atau secara khusus dapat disebut cacat manufaktur biasanya terjadi. Dapat diklaim bahwa cacat produksi, cacat atau ketidakberesan dalam produk yang timbul dari kesalahan dalam produksi atau manufaktur. Dalam komposit yang diperkuat serat alami, cacat manufaktur dapat disebabkan oleh variasi batch-ke-batch selama prepreg dan kadang-kadang oleh pendekatan tradisional selama konstruksi atau teknik fabrikasi yang dikenal sebagai metode hand lay-up. Variabilitas cacat manufaktur dapat berasal dari perbedaan tingkat tack prepreg selama hand lay-up karena kandungan resin yang bervariasi. Dalam komposit serat alam, itu dapat berisi beberapa cacat yang diperkenalkan selama

proses manufaktur, yang dapat sangat meningkatkan kemungkinan kegagalan komposit. Secara umum, cacat komposit yang diperkuat serat alami dapat terbentuk selama proses pembuatan dan termasuk, tetapi tidak terbatas pada cacat ikatan, delaminasi, ketidaksejajaran serat, cacat serat, benda asing, matriks yang diawetkan tidak sempurna, retak lapis, fraksi volume serat yang salah, misalignment lapisan, porositas atau rongga dalam material dan serat bergelombang. Scheirs (ketidaksejajaran lapisan, porositas atau rongga pada material dan serat bergelombang. Scheirs (ketidaksejajaran lapisan, porositas atau rongga pada material dan serat bergelombang. Scheirs (2000) diklasifikasikan cacat manufaktur sebagai misalignment serat, kantong cross-linker yang tidak terdispersi, zona kaya resin, daerah di mana resin telah membasahi serat dengan buruk atau area pengawetan yang tidak lengkap dan rongga.

Campbell (2010) menyatakan dua cacat manufaktur yang paling umum dalam laminasi padat adalah porositas dan benda asing. Porositas, dalam bentuk rongga, dapat diperkenalkan dengan berbagai cara tergantung pada metode pembuatannya. Secara umum, banyak faktor yang menyebabkan terjadinya porositas atau rongga pada komposit. Selama fabrikasi komposit karena komponen resin yang mudah menguap atau gelembung udara yang tidak terkontrol dengan baik selama proses curing dan terperangkap dalam matriks, dikenal sebagai porositas atau rongga. Selama fabrikasi atau proses pembuatan komposit yang diperkuat serat alam, rongga juga dapat berkembang karena terjadinya pengotor dalam resin epoksi komersial yang digunakan, yang dapat mempengaruhi dan mengakibatkan perilaku pengawetan resin epoksi. Pengotor ini dapat berupa oligomer atau residu turunan melalui reaksi sintesis. Seperti yang telah

dilaporkan oleh Scheirs (2000), pengotor khas seperti Klorohidrin ditemukan dalam resin epoksi. Roychowdhury dkk. (1992) melaporkan bahwa rongga yang terjadi secara signifikan meningkatkan pengambilan kelembaban dan melemahkan adhesi antarmuka antara serat dan matriks secara tidak langsung mempengaruhi sifat mekanik dari bahan komposit. Pada tahun 1980, Bascom et al. telah menentukan deformasi antara resin F-185 dan serat kaca menggunakan Scanning Electron Micrograph (SEM) dan sebagai bukti mikrograf SEM menunjukkan terjadinya struktur berpori pada resin epoksi yang diamati dengan jelas. Perkembangan struktur berpori juga ditentukan oleh Suriani et al. (2012) dalam studinya tentang komposit epoksi yang diperkuat serat Kenaf oleh Infrared Thermal Imager. Angka1 menggambarkan rongga atau struktur berpori dalam resin epoksi seperti yang diamati pada epoksi yang diperkuat serat Kenaf.

Ada dua jenis kekosongan yang diklasifikasikan oleh Judd dan Wright (1978) menjadi dua jenis yang dapat dikenali sebagai rongga di sepanjang tulang atau serat tunggal dan rongga di antara lapisan atau lamina matriks serat. Untuk laminasi yang dibuat menggunakan matriks resin cair, penyebab terjadinya void adalah gelembung udara. Ini dapat terperangkap dalam resin selama proses pembuatannya atau di dalam laminasi saat resin epoksi bergerak melalui serat, terlepas dari proses yang digunakan. De-gassing adalah metode yang dapat membantu menghilangkan rongga sebelum penggunaan resin. Senyawa organik yang mudah menguap (VOC) adalah yang lain.



Gambar 2. Zona kaya resin (Suriani et al. 2012)



Gambar 3 Kantong-kantong pengikat silang yang tidak tersebar (Suriani et al. 2012)

3 Kantong Cross-Linker yang Tidak Terdispersi

Dalam literatur, Scheirs (2000) menerbitkan bahwa kantong cross-linker yang tidak terdispersi dapat dipengaruhi oleh distribusi bahan pengawet dan

pengawetan prematur atau pengawetan tidak lengkap. Angka 3 menggambarkan kantong cross-linker yang tidak tersebar seperti yang ditentukan oleh Suriani et al. (2012) dalam studi mereka tentang bahan komposit epoksi yang diperkuat kenaf. Seperti yang diklaim oleh Lapique dan Redford (2002), penting untuk memahami sifat mekanik dan reologi dari perekat atau resin epoksi sebelum menguji sifat struktur komposit. Akibatnya, kinerja dalam perekat atau resin epoksi akibat pengerasan dini atau pengerasan yang tidak sempurna dapat mempengaruhi hasil perilaku adhesi antar muka. Selain itu, juga dapat menyebabkan pembengkokan pada struktur komposit selama proses curing.

4 Misalignment dari Serat

Dispersi yang rendah dari matriks serat dan adhesi antarmuka yang buruk atau ikatan yang lemah dari matriks serat adalah dua penyebab yang dapat

mempengaruhi ketidaksejajaran serat pada material komposit yang diperkuat serat. Seperti dalam literatur yang disebutkan, adhesi antarmuka antara matriks serat memainkan peran penting dalam menentukan kinerja bahan komposit yang diperkuat serat. Keener dan Stuart (2004); Matana dkk. (2001); Saheb dan Jog (1999) dalam studi mereka mengklaim bahwa sistem heterogen yang sifatnya lebih rendah karena adhesi antarmuka yang buruk antara serat dan matriks dipimpin oleh penggabungan serat (hidrofilik) dan polimer (hidrofobik). Ini juga dapat dikenali terutama karena hidrofobisitasnya yang kontradiktif karena matriks polimer umumnya hidrofobik dan permukaan serat bersifat hidrofilik sehingga mereka tidak kompatibel dan melarang ikatan yang efisien antara serat dan matriks Khalina et al. (2009) mempelajari sifat mekanik dan reologi.



Gambar 4 Serat yang tidak sejajar (Suriyani et al. 2012)

Komposit polimer diperkuat serat kelapa sawit pendek (OPF) cetakan injeksi dan dilaporkan bahwa pengasaran serat mungkin meningkatkan sifat mekanik seperti peningkatan ikatan antarmuka antara serat dan matriks. Sanadi dkk. (2001) telah melaporkan bahwa kelemahan utama komposit yang diperkuat serat alami adalah adhesi antarmuka yang buruk karena profil hidrofilik selulosa. Faktanya, semua serat alam bersifat hidrofilik seperti yang dikemukakan oleh Mohanty et al. (2000) dan Leman (2011) dalam penelitiannya telah mengkonfirmasi bahwa selulosa hidrofilik biasanya tidak

sesuai dengan bahan matriks hidrofobik yang digunakan dalam pembuatan komposit matriks serat atau bahan komposit yang diperkuat serat. Oleh karena itu, fenomena ini memulai dispersi serat yang rendah dan adhesi antarmuka matriks serat yang lemah dan kemudian berpengaruh pada ketidaksejajaran serat. Angka 4 menggambarkan ketidaksejajaran serat yang telah dibahas oleh Suriani et al. (2012). Cacat ini terjadi karena lemahnya antarmuka antara serat dan epoksi (matriks) dan dari dispersi serat/epoksi yang tidak seragam seperti yang telah dipelajari sebelumnya oleh Leman (2011).

Oleh karena itu, dalam artikel tentang faktor-faktor kritis pada proses pembuatan komposit serat alam Hoa et al. (2012) melaporkan bahwa karena daya rekat antar muka yang lemah, serat-serat penarik telah mengencerkan kandungan matriks dan bertindak sebagai cacat atau cacat yang mengurangi luas penampang efektif dan,

akhirnya mempengaruhi perilaku kekuatan yang buruk. Selain itu, pembentukan aglomerasi serat tarik, karena ikatan hidrogen antar serat yang mencegah dispersi serat yang buruk selama proses pembuatan dan dengan demikian menurunkan perilaku kekuatan dan secara tidak langsung mempengaruhi penampilan komposit (Matuana et al.2001; Kazayawoko1999).

5 Serat-Matriks yang Tidak Lengkap

Sifat kinerja yang lebih rendah dalam produk akhir komposit serat alami dapat dimulai oleh kegagalan resin dan banyak kegagalan resin terkait dengan penyembuhan yang tidak sempurna atau penyembuhan prematur dari matriks serat atau area di mana resin telah dibasahi dengan buruk.

serat. Gonzaleza dkk. (1999) menggunakan metode impregnasi untuk membuat komposit serat alam. Diklaim

bahwa serat alam selalu mengalami area basah yang buruk dan gagal dibasahi sepenuhnya dengan mengikuti proses manufaktur umum karena tidak dirancang untuk membasahi serat dengan serat yang rapat. Hal ini disebabkan viskositas polimer biasanya terlalu tinggi untuk proses impregnasi. Sebagai alternatif, pra-impregnasi serat yang lebih baik meningkatkan pembasahan serat yang lebih baik dan dengan demikian meningkatkan interlocking mekanis antara matriks. Sebuah agen kopling atau compatibilizer yang digunakan dalam modifikasi permukaan serat untuk transfer tegangan yang efektif di seluruh antarmuka dieksplorasi. Coupling agent adalah zat kimia yang mampu bereaksi secara kimia pada serat alami dan matriks polimer selama pemrosesan untuk meningkatkan ikatan yang lebih kuat pada antarmuka sebagai jembatan untuk meningkatkan sifat mekanik komposit yang dihasilkan. Selain itu, compatibilizer adalah sejenis agen antarmuka polimer atau polimer dengan gugus fungsi yang

dicangkokkan ke rantai polimer. Juga, seperti yang dilaporkan oleh Matuana et al. (2001) karakteristik permukaan serat tempat bahan penggandeng dilekatkan sangat mempengaruhi sifat ikatan yang terbentuk antara bahan penyambung tertentu dan serat. Coupling agent adalah senyawa organologam tetrafungsional yang umumnya dikenal sebagai coupling agent silan, zirkonat, atau titanat dan saat ini, sebagian besar peneliti menggunakan coupling agent atau compatibilizer untuk meningkatkan penyembuhan serat-matriks yang tidak sempurna.

5.1 Distribusi Bahan Pengawet

Untuk mencapai curing yang optimal, pengembangan sifat mekanik yang baik dan kinerja produk akhir yang tinggi, curing agent atau hardener dalam komposit amatrix perlu didistribusikan secara merata. Perwujudan bahan pengawet ke dalam resin amatrix dilakukan pada

pencampuran fisik dua cairan kental, masalah kadang-kadang dapat terjadi karena distribusi bahan pengawet yang tidak merata ke matriks serat. Selain dari proses curing yang tidak sempurna, butiran bahan curing agent yang kaya juga dapat berkontribusi pada lokasi kegagalan.

5.2 Penyembuhan Dini

Dalam metode yang digunakan untuk rekonstruksi yang tepat dari resin polimer, perlu untuk menerapkan suhu yang lebih rendah dari titik gel untuk menyembuhkan polimer; jika tidak, molekulmolekul pengikat silang tidak akan memberdayakan gerakan yang cukup untuk bermigrasi ke situs reaktif polimer karena peningkatan viskositas sistem resin. Selain itu, jika resin polimer mengering sebelum waktunya atau tidak sempurna pada siklus pengawetan yang salah, waktu yang tersedia tidak cukup untuk gas yang terperangkap untuk keluar dan

untuk bagian depan aliran untuk cukup melebur. Akibatnya, cacat kosmetik atau lecet dan garis las yang lemah dapat terjadi, yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan dapat menyebabkan kegagalan.



Gambar 5 Resin basah yang buruk (Suriani et al. 2012)

cacat permukaan resin polimer dapat dikaitkan dengan gelasi prematur resin. Sebagai contoh, penggunaan resin fenolik menghasilkan bagian atau cacat yang tidak memadai yang menunjukkan ketidaksempurnaan permukaan yang keras atau kesalahan. Dalam hal ini, ketidaksempurnaan permukaan dikaitkan dengan resin yang mencapai gelasi sebelum kavitas diisi. Angka5

menggambarkan matriks serat penyembuhan yang tidak sempurna atau resin basah yang buruk seperti yang diterbitkan oleh Suriani et al. (2012).

6 Kesimpulan

Sebelumnya sebagian besar penelitian telah dilakukan untuk mempelajari potensi penggunaan serat alam untuk berbagai aplikasi teknik dan bab ini secara khusus membahas yang paling banyak dipelajari tentang cacat manufaktur pada bahan komposit yang diperkuat serat alam. Pembuatan bahan komposit yang diperkuat serat alam atau biokomposit telah diteliti secara ekstensif dan digunakan dalam berbagai metode dan teknik dalam banyak aplikasi dan penentuan cacat manufaktur telah secara signifikan dipengaruhi dan memainkan peran penting bagi berbagai industri untuk mengembangkan komposit yang diperkuat serat alam berkualitas tinggi. bahan atau bahan biokomposit dan secara bersamaan

meningkatkan perilaku sifat mekanik dan kinerja produk akhir.

Referensi

Bascom WD, Bitner JL, Moulton RJ, Siebert AR (1980) Composites 11(1):9–18
Campbell FC (2010) Structural composite materials. ASM International, Materials Park, Ohio
Dewimille B, Bunsell AR (1983) Composites 4(1):35–40

Dong CS, Tsai TC (2010) Formation of resin-rich zones in composites processing. Advan Mater Res 123–125:543–546

Faruk O, Bledzki AK, Fink H-P, Sain M (2012) Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Prog Polym Sci 37:1552–1596

Gonzaleza AV, Cervantes-Uca JM, Olayob R (1999) Effect of fiber surface treatment on the fiber– matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. *Compos Part B* 30:309–320

Hoa M, Wanga H, Leeb J-H, Hoc C-K, Laua K-T, Lenge J, Hui D (2012) Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Compos Part B: Eng* 43(8):3549–3562

Judd NCW, Wright WW (Jan/Feb 1978) Voids and their effects on the mechanical properties of composites—an appraisal. *SAMPE J* 14(1):10–14

Kazayawoko M (1999) Surface modification and adhesion mechanisms in wood fiber-polypropylene composites. *J Mater Sci* 34:6189–6199

Keener TJ, Stuart RK (2004) Maleated coupling agents for natural fibre composites. *Compos A* 35:357–362

Khalina A, Jalaludin H, Ansell MP, Khairul Zaman MD, Janius R, Nor Azowa I (2009) Mechanical and rheological properties of injection moulded short oil palm fibre reinforced polymer composites. In: Sapuan MS (ed) *Research on natural fibre reinforced polymer composites*. Universiti Putra Malaysia Press, Serdang, pp 109–125

Lapique F, Redford K (2002) *Intl Adhesion Adhesives* 22(4):337–346

Leman Z (2011) Mechanical properties of sugar palm fibre-reinforced epoxy composites. Doctoral Dissertation, Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia

Matuana LM, Balatinecz JJ, Sodhi RNS, Park CB (2001) Surface characterization of esterified cellulosic fibers by XPS and FTIR Spectroscopy. *Wood Sci Technol* 35:191–201

Mohanty AK, Khan MA, Hinrichsen G (2000) *Compos Part A* 31:143–150

Roychowdhury S, Gillespie JW, Advani SG (1992) Void formation and growth in thermoplastic processing. 3rd conference on computer aided design in composite

material technology ADCOMP 1992. Computational Mechanics Publisher, Southampton, England, pp 89–107

Saheb DN, Jog JP (1999) Natural fiber polymer composites: a review. *Adv Polym Technol* 18(4):351–363

Sanadi AR, Caufield DF, Kovacsvolgyi G, Destree B (2001) High fiber-low matrix composites: kenaf fibre/polypropylene. Paper presented at the meeting of the 6th international conference on wood fibre-plastic composites, Madison

Scheirs J (2000) Compositional and failure analysis. A practical approach. Wiley, Chichester

Suriani MJ, Ali A, Khalina A, Sapuan SM, Abdullah S (2012) Detection of defects in kenaf/epoxy using infrared thermal imaging technique. *Procedia Chem* 4:172–178

Talreja R (2015) Manufacturing defects in composites and their effects on performance. In: Irving PE, Soutis C (eds) *Polymer composites in the aerospace industry*. Woodhead Publishing-Elsevier, Cambridge, United Kingdom, pp 99–113

Tentang Penulis

Fitria Hidayanti lahir di Palembang pada tanggal 04 September 1978 dan telah menyelesaikan pendidikan Sarjana Kimia dari Institut Teknologi Bandung (2002), Magister Material Science dari Universitas Indonesia (2006). Saat ini sedang menyelesaikan Studi Doktorat sejak tahun 2018 di Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia. Sejak tahun 2009, menekuni bidang Teknik Fisika di Universitas Nasional, Jakarta.

Tentang Penulis



Dr (Can) Fitria Hidayanti lahir di Palembang pada tanggal 04 September 1978 dan telah menyelesaikan pendidikan Sarjana Kimia dari Institut Teknologi Bandung (2002), Magister Material Science dari Universitas Indonesia (2006) dan sedang menyelesaikan studi doktoral pada Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia (2018-sekarang). Sejak tahun 2009, menekuni bidang Teknik Fisika di Universitas Nasional, Jakarta.

ISBN 978-623-7273-07-3 (PDF)

