FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung

KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI (*NATURAL FIBER-BASED COMPOSITES*)

Prof. Widayani
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
19 Agustus 2023

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI (*NATURAL FIBER-BASED COMPOSITES*)

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI (*NATURAL FIBER-BASED COMPOSITES*)

Prof. Widayani

19 Agustus 2023
Aula Barat ITB

FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

ITB PRESS

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:
KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI
(NATURAL FIBER-BASED COMPOSITES)

Penulis : Prof. Widayani
Reviewer : Prof. Dr.-Ing. Drs. Ir. Mitra Djamal, IPU, ASEAN Eng.

Editor Bahasa : Rina Lestari
Cetakan I : 2023
ISBN : 978-623-297-319-0

ITB PRESS

Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
+62 22 20469057
www.itbpress.id
office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Alhamdulillahi rabbil ‘alamin, Segala Puji Bagi Allah, Tuhan Seluruh Alam. Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan buku orasi ilmiah ini. Buku ini diharapkan dapat memberikan gambaran umum mengenai komposit berbasis serat alami. Di dalam buku ini juga tercakup rangkaian hasil riset terkait topik komposit berbasis serat alami yang telah dilakukan oleh penulis beserta rekan-rekan sejawat dosen serta para mahasiswa bimbingan.

Penulisan buku ini dapat terlaksana tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan dan diskusi pada penyiapan buku ini, khususnya kepada Prof. Dr.-Ing. Drs. Ir. Mitra Djamal, IPU, ASEAN Eng. yang telah berkenan meluangkan waktu untuk mereviu buku ini. Semoga berbagai bentuk dukungan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan yang berlipat ganda dari Allah Swt..

Akhir kata, penulis sangat berharap semoga buku orasi ilmiah ini bermanfaat bagi masyarakat umum serta perkembangan ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang komposit serat alami.

Bandung, 19 Agustus 2023

Penulis

SINOPSIS

Tulisan ini membahas tentang komposit berbasis serat alami. Komposit adalah material yang dibangun dengan mencampurkan dua material induk, yaitu material pengisi (*filler*) yang biasanya merupakan serat yang bersifat memperkuat, dan matriks. Pada komposit berbasis serat alami, material pengisinya adalah serat alami dan matriksnya adalah polimer. Pada bagian awal disampaikan gambaran umum mengenai komposit berbasis serat alami yang meliputi komponen, perkembangan dan pembuatan komposit berbasis serat alami. Di samping itu, keunggulan dan kekurangan komposit berbasis serat alami juga dibahas.

Selanjutnya pembahasan difokuskan pada beberapa sifat fisis komposit berbasis serat alami, yaitu: sifat mekanis, termal, dan penyerapan bunyi. Uji mekanis yang banyak dilakukan adalah uji tarik dan uji tekan. Dari kedua jenis uji tersebut dapat diperoleh nilai modulus elastisitas yang menggambarkan kekakuan bahan, kekuatan bahan yang merupakan ukuran stres maksimum yang dapat diberikan pada bahan dan *elongation at brake* (EAB), yaitu strain pada saat sampel mulai rusak.

Sifat termal dipelajari dengan pengujian *Thermogravimetry/Differential Thermal Analysis* (TG/DTA). Pada pengujian ini komposit berbasis serat alami dipanaskan secara terprogram. Dari pengujian tersebut, diperoleh data perubahan massa serta kurva laju alir kalor selama pemanasan terhadap temperatur. Fitur penurunan massa pada kurva TG dan perubahan *baseline* serta puncak/lembah pada kurva DTA berkorelasi dengan peristiwa fisika atau kimia yang berlangsung secara eksotermik/endotermik yang dialami sampel. Dari data tersebut, temperatur dan jenis kerusakan yang terjadi pada sampel dapat dipelajari.

Karakteristik penyerapan bunyi perlu dipelajari terkait potensi aplikasi komposit berbasis serat alami sebagai bahan penyerap suara. Pengujian penyerapan suara memberikan data mengenai koefisien absorpsi dalam rentang frekuensi bunyi yang lebar, (64- 6300) Hz.

Berikutnya, aplikasi komposit berbasis serat alami di beberapa bidang disampaikan secara singkat. Aplikasi komposit berbasis serat alami pada

bidang tertentu ditentukan berdasarkan sifat fisis komposit yang sesuai dengan bidang tersebut. Keunggulan utama penggunaan serat alami adalah serat alami tersedia secara melimpah di alam, terurai secara hayati (*bio-degradable*), dapat diperbarui dan tentu saja, ramah terhadap lingkungan.

Kemudian disampaikan beberapa hasil studi teoretis/komputasi terkait karakteristik komposit berbasis serat alami. Topik studi teoritis/komputasi tersebut mencakup modulus elastisitas dan perhitungan intensitas suara yang ditransmisikan oleh model komposit. Untuk itu digunakan model sederhana dari susunan komposit.

Pada bagian akhir dituliskan dua area riset lanjutan terkait komposit berbasis serat alami, yaitu komposit hijau (*green composites*) dan bio-nanokomposit (*bio-nano composites*).

DAFTAR ISI

PRAKATA ..... **v**
SINOPSIS ..... **vii**
DAFTAR ISI ..... **ix**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR TABEL ..... **xii**

1 PENDAHULUAN **1**

2 SERAT ALAMI DAN MATRIKS POLIMER **4**
2.1 Serat Alami 4
2.2 Matriks Polimer 9

3 KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI DENGAN MATRIKS POLIMER **12**
3.1 Perkembangan Komposit Berbasis Serat Alami 12
3.2 Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Berbasis Serat Alami 13
3.3 Sifat Fisis Komposit Berbasis Serat Alami 16

4 APLIKASI KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI **29**
4.1 Material Struktur 29
4.2 Komponen Otomotif 29
4.3 Biomedis 30
4.4 Material Bangunan / Arsitektur 31
4.5 Furnitur 31
4.6 Aplikasi lainnya 32

5 STUDI KOMPUTASI/SIMULASI KOMPOSIT **34**
5.1 Prediksi Modulus Young pada Sistem Tunggal dan Kombinasi Dua Material Anisotropik 34
5.2 Respons Internal Epoksi Menggunakan Model Komposit Serat Lurus 36
5.3 Penyerapan Suara pada Model 1D Komposit 37
5.4 Perhitungan Parameter Y_1 yang Proporsional dengan Modulus Elastisitas pada Model Komposit Dua Dimensi untuk Dua Jenis Butiran 39
5.5 Simulasi Pengaruh Koefisien Gesekan pada Kekuatan Ikatan Antara Matriks dan *Filler* pada Komposit Serat Kontinu 40

6 RISET LANJUTAN **43**
6.1 Komposit Hijau (*Green composites*) 43
6.2 Bio-nanokomposit (*Bio-nanocomposites*) 45

7 RANGKUMAN **47**

8 UCAPAN TERIMA KASIH **49**

DAFTAR PUSTAKA **51**
CURRICULUM VITAE **55**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Klasifikasi serat alami. Serat alami yang berasal dari tumbuhan dan hewan dapat diperbarui. 4
Gambar 2 Serat daun nanas. Panjang serat daun nanas dapat mencapai ~40 cm. 6
Gambar 3 Klasifikasi polimer sebagai matriks pada komposit serat alami. 10
Gambar 4 Rangkaian pembuatan komposit serat alami (disarikan dari Taangga, 2013). 15
Gambar 5 Gambar SEM komposit serat sagu pada berbagai fraksi epoksi (% wt): (a) E9, (b) E13, (c) E17, (d) E20 dan (e) E23 (Widayani *et al*., 2019). 17
Gambar 6 Morfologi komposit serat daun nanas – epoksi dengan tekanan pembuatan yang berbeda: a) sampel 1A (23,15 kN/m^2), b) sampel 1B (24,71 kN/m^2), c) sampel 2 (69,44 kN/m^2), d) sampel 3 (115,74 kN/m^2). Garis kuning dan biru menunjukkan ukuran pori dan diameter serat. (Adhika *et al*., 2020). 18
Gambar 7 Model komposit (a) Voigt, (b) Reuss. 20
Gambar 8 Pemetaan modulus Young terhadap densitas pada material komposit (Hull & Clyne, 1996). 21
Gambar 9 Kurva TG dan DTG dari komposit serat sagu-epoksi untuk berbagai fraksi epoksi (Widayani *et al*., 2019). 24
Gambar 10 Kurva DTA dari komposit serat sagu-epoksi untuk berbagai fraksi epoksi (Widayani *et al*., 2019). 24
Gambar 11 Koefisien absorpsi suara panel komposit serat daun nanas-epoksi yang dibuat dengan tekanan berbeda-beda (Adhika *et al*., 2020). 25
Gambar 12 Koefisien absorpsi suara panel komposit serat daun nanas-epoksi dengan ketebalan berbeda-beda: D = 0.5 cm, D = 1 cm, D = 2 cm, D = 3 cm (Adhika *et al*., 2020). 26
Gambar 13 Koefisien absorpsi suara komposit serat daun nanas dengan kandungan epoksi 11 dan 17 % untuk susunan: (a) satu lapis, (b) dua lapis, (c) tiga lapis (Widayani *et al*., 2022). 27
Gambar 14 Koefisien absorpsi suara komposit serat daun nanas dengan kandungan epoksi 11 dan 17 % (Widayani *et al*., 2022). 28
Gambar 15 Aplikasi NFC dalam bidang biomedis. 30
Gambar 16 Gambaran skematik tiga arah pada batang dan papan kayu: L (Longitudinal), T (Tangensial) dan R (Radial) (Widayani *et al*., 2019). 34
Gambar 17 Konfigurasi seri dan paralel terhadap arah longitudinal (Widayani *et al*., 2019). 35

Gambar 18 Plot modulus Young dari susunan seri dan paralel konfigurasi Longitudinal (L) untuk gabungan Oak red dan Pine red (Widayani *et al*., 2019). 36
Gambar 19 Foto sampel dengan variasi jumlah batang grafit setelah uji kompresi (Aditya *et al*, 2014). 36
Gambar 20 Verifikasi simulasi terhadap hasil eksperimen (Aditya *et al*., 2014). 37
Gambar 21. Ilustrasi komposit dua komponen (50:50) dengan konfigurasi berbeda (Widayani *et al*., 2016). 37
Gambar 22 Intensitas gelombang datang I_i dan yang diteruskan oleh medium I_o (Widayani *et al*., 2016). 38
Gambar 23 Intensitas gelombang transmisi yang melewati komposit (50:50) lebih rendah dari yang melewati kayu saja atau epoksi saja (Widayani *et al*., 2016). 39
Gambar 24 Model komposit granular 2D dengan diameter sama. E, A dan I adalah butiran *ends*, *adhesive,* dan *interstitial*. L_0 adalah Panjang awal, F adalah gaya Tarik (Viridi *et al*., 2012). 40
Gambar 25 Plot Y_1 terhadap konsentrasi butiran interstitial (Viridi *et al*., 2012). 40
Gambar 26 Distribusi strain hasil simulasi Abaqus pada material serat lurus kontinu (Aditya *et al*., 2014). 41
Gambar 27 Plot hasil perhitungan modulus elastisitas terhadap koefisien friksi untuk beberapa nilai modulus elastisitas serat (Aditya *et al*., 2014). 42
Gambar 28 Siklus keberadaan komposit hijau yang tidak menyisakan limbah bagi lingkungan. 44
Gambar 29 Klasifikasi bio-nanocomposite berbasis selulosa (Karki *et al*., 2021). 45
Gambar 30 Aplikasi bio-nanokomposit berbasis selulosa pada berbagai area (Karki *et al*., 2021). 46

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Tingkat ketahanan relatif komponen serat (Peças *et al.*, 2018) 9
Tabel 2 Beberapa karakteristik utama matriks termoset 10
Tabel 3 Beberapa karakteristik utama matriks termoplastik 11
Tabel 4 Contoh serat dan matriks pada NFC 12
Tabel 5 Modulus elastisitas beberapa papan komposit 22
Tabel 6 Contoh pemanfaatan serat alami pada komponen bangunan 31
Tabel 7 Modulus Young Longitudinal (L) dan Tangensial (T). 34

1 PENDAHULUAN

Klasifikasi material mencakup tiga jenis material, yaitu logam, keramik, dan polimer. Setiap jenis material memiliki karakteristik khasnya masing-masing. Contoh bahan logam adalah besi, tembaga, dan seng. Kebanyakan logam merupakan konduktor panas dan listrik. Pada umumnya logam merupakan material kaku dengan nilai modulus elastisitas yang tinggi. Keramik pada umumnya berbasis unsur silikon dan merupakan bahan isolator yang stabil pada temperatur tinggi. Polimer dijumpai baik sebagai polimer alami misalnya getah karet maupun sebagai polimer sintetis seperti poliester, poliuretan, dan polietilen. Polimer sintetis pada umumnya berasal dari produk samping produksi bahan bakar fosil. Pada umumnya polimer memiliki konduktivitas panas dan listrik yang rendah, namun ada juga polimer yang memiliki sifat konduktif. Polimer memiliki karakteristik fisis dan mekanis dalam rentang yang sangat lebar sehingga saat ini penggunaannya dalam kehidupan sehari-hari meliputi berbagai bidang.

Selain ketiga jenis material tersebut, ada jenis material lain yaitu komposit. Komposit adalah material yang terbentuk dari dua atau lebih material induk yang bercampur secara makroskopis. Komposit merupakan material yang memiliki dua atau lebih fasa dan memiliki karakteristik yang berbeda dengan karakteristik material pembentuknya. Komposit terdiri atas material pengisi (*filler*) dan matriks. Matriks terikat pada *filler* sehingga membentuk satu kesatuan. Sifat komposit dipengaruhi oleh sifat bahan induk, kekuatan ikatan yang terbentuk antara *filler* dan matriks, densitas, dan homogenitas. Secara mekanis beban pada matriks ditransfer ke *filler* sehingga komposit mampu menahan beban lebih baik dari matriks.

Meskipun komposit sudah sejak lama dikenal oleh manusia, seperti bata lumpur yang diperkuat dengan jerami untuk digunakan dalam konstruksi (pada masa sebelum masehi), namun pengembangan komposit modern dimulai dengan pembuatan *fabric reinforced phenolic resins* (1930) dan *glass-fiber-reinforced plastics* (1940) (Schaffer *et al*., 1999). Resin fenolik digunakan dalam berbagai aplikasi misalnya elektronik, sistem pipa air lepas pantai, dan sebagainya. Resin fenolik dikenal baik untuk aplikasi pada temperatur tinggi di mana komponen harus memenuhi standar keselamatan kebakaran. *Glass-*

fiber-reinforced plastics digunakan dalam berbagai aplikasi misalnya sebagai komponen mobil dan elektronik. Keunggulan material ini di antaranya adalah kekuatan tarik yang tinggi, ringan, dan tahan terhadap korosi.

Para peneliti melakukan kajian untuk mengembangkan berbagai jenis komposit untuk berbagai aplikasi. Kajian tersebut meliputi berbagai aspek seperti pengembangan resin matriks baru, penggunaan jenis serat penguat baru, serta metode dan teknologi produksi komposit. Pengembangan komposit ditujukan untuk memperoleh material baru dengan karakteristik yang lebih unggul dari karakteristik material pembentuknya. Jenis komposit yang dapat dikembangkan sangat banyak karena baik jenis *filler* maupun matriks jumlahnya sangat banyak. Kondisi ini memicu pengembangan aplikasi komposit.

Penelitian dalam bidang komposit tidak hanya dilakukan secara eksperimen, tetapi juga teoritis. Kajian teoritis dilakukan untuk mempelajari berbagai hal mengenai komposit seperti korelasi antara struktur mikro dengan sifat komposit, serta prediksi sifat komposit. Kini kajian teoritis juga mencakup pemodelan dan komputasi/simulasi. Dengan metode tersebut diharapkan mekanisme yang melibatkan interaksi matriks dan *filler* ataupun korelasi antara karakteristik komposit dengan struktur mikronya dapat dipelajari.

Berdasarkan jenis bahan matriks komposit, ada tiga kelompok utama komposit yaitu: *Metal Matrix Composites* (MMC's), *Ceramic Matrix Composites* (CMC's), dan *Polymer Matrix Composites* (PMC's). Contoh ketiga kelompok tersebut adalah: Contoh jenis MMC's adalah aluminium dengan serat Boron atau SiC (*Silicon carbide*), serta magnesium dan tembaga dengan serat karbon. Keunggulan MMC's di antaranya adalah memiliki ketahanan termal yang baik, serta kekuatan tekan dan geser yang tinggi. Contoh jenis CMC's adalah penggunaan serabut (*whiskers*) SiC dalam Al_2O_3 yang digunakan dalam berbagai aplikasi misalnya sebagai material struktur di bidang rekayasa atau elektronik. Pada komposit yang termasuk PMC's, digunakan matriks polimer jenis termoset seperti epoksi dan poliester, atau jenis termoplastik seperti polipropilen dan polietilen. Berbagai jenis serat seperti gelas, boron, karbon, atau bahan organik tertentu, dapat digunakan dalam pembuatan PMC's. Keutamaan PMC's adalah karakteristik yang baik pada temperatur kamar,

ringan, dan harganya yang murah. Dengan keunggulan ini PMC's sudah banyak diaplikasikan terutama dalam bidang otomotif dan bahan bangunan.

Selain ketiga kelompok tersebut ada pula jenis komposit lainnya, yaitu *Carbon Carbon Composites* (C/C's). Komposit ini agak berbeda dengan jenis lainnya karena baik serat maupun matriksnya adalah karbon. Keunggulan C/C's adalah ketahanannya pada temperatur yang sangat tinggi, hingga di atas 3000 °C.

Komposit juga diklasifikasikan berdasarkan jenis *filler* yang merupakan material penguat dari komposit. Sebagai material penguat, artinya sifat mekanis *filler* lebih unggul dibandingkan dengan matriks sehingga ketika keduanya bergabung membentuk komposit akan diperoleh material yang lebih kuat dari matriks. Komposit juga dikelompokkan berdasarkan bentuk *filler* yaitu: partikel, serat, atau serpihan (*flake*). Partikel dan serat mempunyai ukuran lebih kecil dari serpihan. Pada umumnya *filler* tersebar secara merata di dalam komposit. Selain itu, komposit juga dikelompokkan berdasarkan cara penyusunan komponen-komponennya. Misalnya kelompok komposit *laminate* terbuat dari susunan berlapis dari material pembentuknya. Kelompok lainnya adalah komposit anyaman/tenun (*woven*) dua dan tiga dimensi seperti pada kain tenun.

Salah satu jenis komposit yang banyak dikembangkan adalah komposit berbasis serat alami (*natural fiber-based composite*/NFC). Kebutuhan pengembangan NFC dipicu oleh munculnya polusi pada lingkungan tanah dan air akibat banyaknya sampah yang dihasilkan dari produk yang bersifat *non-biodegradable*. Keutamaan penggunaan serat alami adalah ketersediaan serat alami di alam melimpah dan dapat diperbarui. Jenis serat alami juga sangat beragam dan karakteristiknya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti geografis, cuaca, umur, dan lain-lain. Akibatnya, jenis serat tertentu dari suatu daerah dapat memiliki karakteristik sedikit berbeda dengan jenis serat yang sama dari daerah lain.

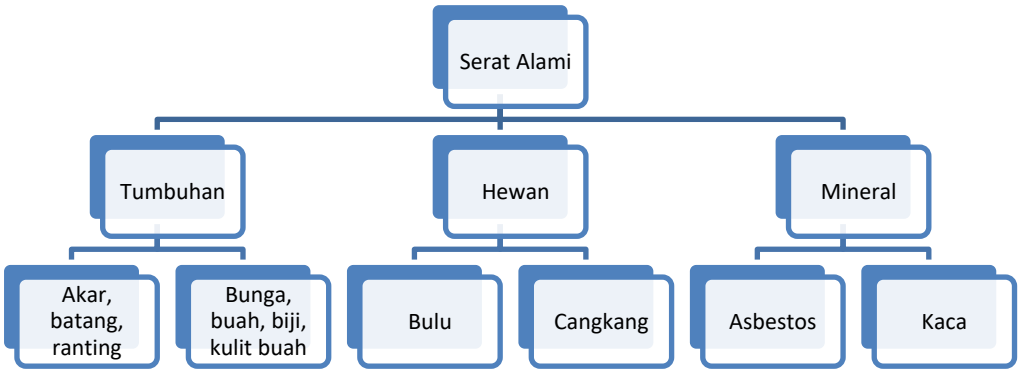
Material matriks untuk NFC adalah polimer. Baik serat alami maupun polimer pada umumnya tidak dapat bertahan pada temperatur tinggi, oleh karenanya NFC diaplikasikan pada sekitar temperatur ruang.

2 SERAT ALAMI DAN MATRIKS POLIMER

2.1 Serat Alami

Jenis-jenis Serat Alami

Serat alami adalah serat yang berasal dari tumbuhan, hewan, dan mineral (Gambar 1). Semua serat alami tersedia di alam. Tumbuhan dan hewan adalah sumber serat alami yang dapat diperbarui. Di dalam hutan, tumbuhan dan hewan hidup dan berkembang biak tanpa campur tangan manusia. Di pemukiman, masyarakat membudidayakan tumbuhan dan hewan untuk kebutuhan hidupnya. Dengan demikian keberadaan tumbuhan dan hewan dapat terjaga. Berbeda dengan tumbuhan dan hewan, mineral tidak dapat diperbarui. Mineral terbentuk di alam dalam kurun waktu yang sangat lama, dapat mencapai jutaan tahun, melalui proses geologi yang berlangsung secara alami.



Gambar 1 Klasifikasi serat alami. Serat alami yang berasal dari tumbuhan dan hewan dapat diperbarui.

Serat alami dari tumbuhan dapat berasal dari semua bagian tumbuhan seperti akar, batang, daun, buah, biji, dan bunga. Secara umum serat tumbuhan terdiri atas selulosa, hemiselulosa, lignin, pektin, dan wax. Komposisi setiap komponen dari satu bagian ke bagian tumbuhan yang lain berbeda-beda, demikian juga untuk bagian yang sama dari satu tumbuhan ke tumbuhan lain. Selulosa adalah bagian utama dari serat tumbuhan. Selulosa merupakan polimer (polisakarida) dengan struktur kristal dan amorf (mikrofibril heliks) di sepanjang serat. Makromolekul selulosa linear dihubungkan oleh ikatan hidrogen dan terkait erat dengan hemiselulosa dan lignin yang memberi sifat kaku pada serat (Peças *et al.*, 2018).

Struktur organisasi dinding sel serat alami terdiri atas susunan empat dinding sel sesumbu. Jaringan mikrofibril selulosa kristalin tersusun secara acak pada dinding terluar (dinding utama) sementara pada dinding-dinding sel yang lebih dalam (dinding sekunder S1, S2, S3) tersusun secara heliks. Di sekitar jaringan mikrofibril selulosa kristalin terdapat area *amorf* yang terdiri atas lignin dan hemiselulosa (Gholampour and Ozbakkaloglu, 2020). Lignin membantu serat untuk menahan air di dalamnya, memberi perlindungan terhadap serangan biologis, dan membantu pengerasan batang sehingga ia dapat menahan gaya gravitasi dan gaya akibat aliran udara. Hemiselulosa, lazim dalam serat dasar, dianggap bertindak sebagai *compatibilizer* lignin dan selulosa.

Komponen utama serat dari hewan adalah protein. Serat hewan dapat berasal dari berbagai bagian tubuh hewan. Tekstur, ukuran dan karakteristik serat hewan berbeda-beda. Manusia sudah sejak lama memanfaatkan bagian tubuh hewan sebagai material untuk keperluannya. Di negara empat musim, bulu domba dimanfaatkan sebagai bahan pakaian untuk musim dingin, yang dikenal sebagai bahan wool. Di Asia, serat sutra yang berasal dari kepompong ulat sutra dibuat menjadi kain sutra yang merupakan tekstil yang halus dan berkualitas tinggi. Selain sebagai bahan pakaian, ada pula serat alami yang digunakan dalam aplikasi lain, misalnya penggunaan kitin dalam pembuatan kosmetik. Kitin adalah polimer yang berasal dari cangkang binatang laut seperti udang dan kerang. Saat ini kitin sudah tersedia di pasar lokal.

Contoh serat alami yang berasal dari mineral adalah asbestos, grafit, dan gelas. Serat mineral alami memiliki ketahanan termal yang sangat tinggi, titik lelehnya mencapai (1450-1500) °C (https://textilelearner.net/mineral-fiber-properties-types-and-uses/). Serat mineral alami juga merupakan isolator yang baik. Contoh penggunaan asbestos adalah sebagai komponen alat pelindung pada pemadaman kebakaran dan bahan isolasi panas untuk bangunan. Serat asbestos juga digunakan dalam pembuatan tekstil sebagai penahan panas. Akan tetapi, penggunaan asbestos membahayakan bagi kesehatan sehingga kemudian digantikan dengan bahan yang lain.

Dalam pengembangan NFC, serat dari tumbuhanlah yang paling banyak digunakan. Oleh karena itu pada pemaparan berikutnya, pembahasan mengenai serat alami terutama mengacu kepada serat alami dari tumbuhan.

Serat tumbuhan dapat diperoleh secara langsung seperti serabut kelapa, atau melalui perlakuan mekanis/kimiawi tertentu.

Gambar 2 Serat daun nanas. Panjang serat daun nanas dapat mencapai ~40 cm.

Tampilan visual serat yang berasal dari berbagai tumbuhan tidak jauh berbeda. Sebagai contoh, serat daun nanas ditunjukkan pada Gambar 2 tampilannya serupa dengan serat tandan kosong kelapa sawit. Manfaat utama dari budidaya nanas adalah buah nanas, sementara daun nanas cenderung menjadi limbah padahal tanaman nanas didominasi dengan daunnya. Namun kini serat daun nanas telah banyak dimanfaatkan, di antaranya dalam pengembangan komposit serat alami.

Keunggulan dan Kelemahan Serat Alami

Penggunaan serat alami khususnya sebagai pengganti serat gelas atau serat sintetis dalam pembuatan komposit telah berkembang sangat pesat. Hal ini dilatarbelakangi oleh isu lingkungan dan beberapa keunggulan penggunaan serat alami. Masyarakat di berbagai belahan dunia menggunakan material yang tidak dapat terurai secara hayati dalam jumlah yang sangat besar. Contohnya, plastik/polimer seperti plastik kemasan makanan/minuman dan kantong plastik digunakan oleh masyarakat secara masif dalam kehidupan sehari-hari. Meskipun plastik mempunyai karakteristik yang dapat memenuhi banyak aplikasi dan relatif murah harganya, namun karena plastik tidak dapat terurai secara hayati dan tak dapat terurai dalam waktu singkat, maka sampah plastik menumpuk dan mencemari lingkungan.

Penggunaan serat tumbuhan dalam pengembangan komposit memiliki beberapa keunggulan sebagai berikut. Pertama adalah ketersediaan yang

melimpah di alam serta dapat diperbarui. Hal ini membuat serat tumbuhan dapat terus menerus tersedia (*sustain*). Sebagai contoh, dua jenis serat tumbuhan yang telah sangat banyak dimanfaatkan, yaitu bambu dan kelapa. Bambu adalah salah satu tanaman yang sangat mudah tumbuh di daerah pegunungan tropis/subtropis dan memiliki jenis yang sangat banyak. Sementara kelapa tumbuh subur di daerah pantai. Indonesia sebagai negara tropis dan kepulauan memiliki peluang besar sebagai penghasil bambu dan kelapa. Di samping bambu dan kelapa, banyak jenis tanaman lain yang tumbuh dengan baik di alam Indonesia.

Keunggulan berikutnya adalah serat tanaman terdegradasi secara hayati (*biodegradable)*, karena berasal dari tumbuhan. Sifat *biodegradable* sangat dibutuhkan untuk pengembangan bahan yang ditujukan untuk mengatasi pencemaran lingkungan. Di banyak daerah, limbah perkebunan dibiarkan membusuk begitu saja atau langsung dibakar. Lama proses pembusukan limbah kebun yang dibiarkan begitu saja bergantung pada jenis tanaman dan cuaca. Limbah tanaman yang dibiarkan membusuk tidak membahayakan lingkungan bahkan berpeluang menjadi pupuk alami. Namun jika dapat diolah dengan lebih baik, akan sangat berpotensi dalam meningkatkan nilai ekonominya. Limbah tanaman yang langsung dibakar dapat menimbulkan polusi udara yang mengganggu kenyamanan dan kesehatan manusia dan hewan.

Kebanyakan serat tanaman tidak berbahaya bagi kesehatan manusia. Secara umum serat tanaman cenderung aman digunakan baik dalam ruang ataupun dengan kontak langsung dengan manusia. Meskipun demikian, ada jenis tumbuhan yang berdampak pada tubuh misalnya getah talas yang dapat menimbulkan gatal, namun masyarakat Indonesia dapat mengolah talas dengan aman. Talas adalah umbi yang banyak dikonsumsi di Indonesia.

Dari aspek sifat fisisnya, terdapat beberapa keunggulan serat tanaman dibandingkan dengan logam. Serat tanaman memiliki densitas yang lebih rendah, jadi penggunaan serat tanaman dapat menghasilkan material yang lebih ringan. Serat tanaman juga tidak mengalami korosi sehingga aman digunakan di udara terbuka. Tidak seperti logam, serat tanaman termasuk bahan isolator, yaitu bahan yang tidak menghantarkan panas maupun listrik.

Keunggulan lain dari serat tanaman adalah dari aspek sifat mekanisnya. Sifat mekanis serat tanaman dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis dan bagian tanaman, lokasi tumbuh, cuaca, proses pertumbuhan, usia tanaman, dan sebagainya. Pada umumnya serat alami bersifat anisotropis, di mana karakteristiknya bergantung pada arah dari beban luar. Kekuatan tarik serat pada arah beban luar yang searah dengan arah seratnya lebih tinggi dibandingkan dengan arah beban luar yang lain. Modulus elastisitas, kuat tarik, dan strain saat rusak (*elongation at brake* EAB) untuk berbagai serat tanaman bervariasi dalam rentang 2,3-128 MPa; 80-1500 MPa dan 1,16-49 % (Namvar *et al.*, 2014).

Di samping berbagai keunggulan yang telah disampaikan, juga terdapat beberapa kelemahan serat tanaman. Serat tanaman tidak tahan pada temperatur tinggi. Komponen utama serat, selulosa, mulai mengalami degradasi termal pada temperatur di bawah 300 °C. Kondisi ini membatasi rentang temperatur penggunaan serat tanaman. Sebagai bahan organik, atom-atom utamanya adalah C, H dan O sehingga serat tanaman mudah terbakar.

Kelemahan serat alami lainnya adalah ketahanannya yang rendah terhadap air. Serat tanaman mudah menyerap air sehingga mudah terjadi penggelembungan (*swelling*). Proses ini berdampak pada penurunan sifat mekanis serat. Akibatnya pemakaian serat tidak awet. Di samping itu, serat tanaman juga kerap mendapat gangguan serangga sehingga sering kali perlu dilakukan perlakuan khusus untuk meminimalisir gangguan serangga.

Pengaruh Serat Alami pada Karakteristik Komposit

Karakteristik NFC dipengaruhi oleh karakteristik serat alami yang digunakan. Karakteristik serat bergantung pada komposisi komponen pembentuknya. Setiap komponen serat memiliki karakteristik berbeda, yang secara keseluruhan berkontribusi pada karakteristik serat. Beberapa karakteristik penting serat alami yang menjadi pertimbangan dalam pengembangan NFC mencakup sifat mekanis, ketahanan termal, degradasi alami, penyerapan air dan degradasi UV seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Sebagai contoh, sesuai dengan Tabel 1, kekuatan mekanis serat yang mengandung kandungan selulosa terkristal paling tinggi menghasilkan kekuatan mekanis tertinggi.

Dalam pembuatan NFC, ada beberapa kendala dalam penggunaan serat alami seperti tidak awet, daya serap air yang tinggi, keterbasahan, dan daya rekat yang rendah terhadap matriks (Hoque *et al.*, 2021). Untuk mengatasinya, dapat dilakukan beberapa persiapan/modifikasi serat alami yaitu modifikasi secara fisis, kimiawi atau biologi. Contoh modifikasi fisis adalah mengurai bundel serat dengan cara menarik atau menggiling. Contoh modifikasi kimiawi adalah perlakuan alkalin untuk mengurangi tingkat hidrofilik serat. Perlakuan tersebut ditujukan untuk meniadakan ikatan OH pada serat. Modifikasi biologi utamanya ditujukan untuk memodifikasi permukaan serat dengan melibatkan mikroorganisme (bakteri, jamur). Modifikasi ini diperlukan untuk meningkatkan daya kontak serat dengan matriks (Gholampour and Ozbakkaloglu, 2020).

Tabel 1 Tingkat ketahanan relatif komponen serat (Peças *et al.*, 2018)

Kekuatan:	Lignin → Hemiselulosa+Lignin → Selulosa Tak Terkristal → Selulosa Terkristal
Degradasi Termal:	Lignin → Selulosa → Hemiselulosa
Degradasi Biologis:	Lignin → Selulosa Terkristal → Selulosa Tak Terkristal
Penyerapan uap air:	Selulosa Terkristal → Lignin → Selulosa Tak Terkristal
Degradasi UV:	Selulosa Terkristal → Selulosa Tak Terkristal → Hemiselulosa →Lignin

2.2 Matriks Polimer

Matriks polimer untuk NFC dapat dapat dikelompokkan menjadi dapat terurai penuh dan dapat terurai sebagian. Pemilihan matriks yang dapat terurai penuh akan menghasilkan komposit yang dapat terdegradasi secara penuh. Matriks yang dapat terdegradasi penuh berasal dari alam seperti *polyactic acid* (PLA), ataupun yang berasal dari minyak seperti poliester alifatik dan poliester alifatik-aromatik. Sedangkan contoh matriks yang bersifat dapat terurai sebagian adalah polipropilen dan polietilen (Gholampour and Ozbakkaloglu, 2020).

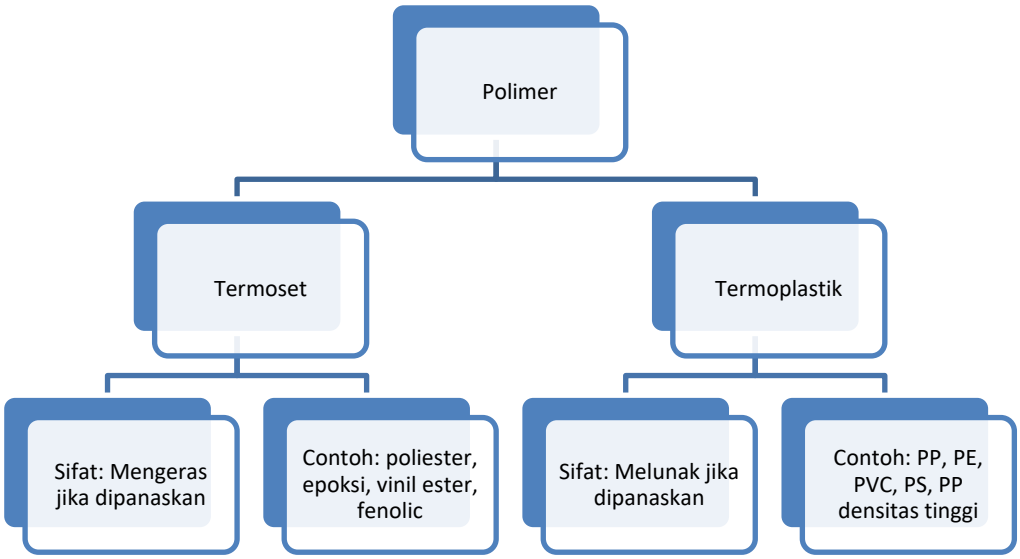
Resin dari sumber petrokimia ada dua jenis yaitu termoset dan termoplastik (Gambar 3). Termoset adalah polimer yang mengeras jika dipanaskan dan tidak dapat kembali lunak jika didinginkan, hal ini terjadi karena terbentuknya ikatan kimia antar-rantai. Contoh beberapa jenis polimer termoset adalah: epoksi, fenolik, dan poliester. Keunggulan polimer termoset di antaranya adalah nilai viskositas yang sangat rendah sehingga proses pencampuran dengan serat dapat dilakukan pada tekanan rendah.

Sifat mekanis polimer termoset sesuai untuk aplikasi bahan komposit struktural.

Beberapa karakteristik utama beberapa polimer termoset dari penelitian-penelitian sebelumnya, ditunjukkan pada Tabel 2 (Gowda *et al.*, 2018). Salah satu resin termoset yang banyak digunakan adalah epoksi. Epoksi memiliki sifat mekanis dan kimia yang sangat baik. Epoksi juga memiliki ketahanan korosi dan stabilitas termal dan dimensi yang baik. Epoksi banyak digunakan sebagai perekat dan pelapis (Ren *et al.*, 2008).

Tabel 2 Beberapa karakteristik utama matriks termoset

Termoset	Densitas (g/cm^3)	Modulus Tarik (GPa)	Kuat Tarik (MPa)	Strain saat rusak (%)	Kuat Tekan (MPa)
Poliester	1,0-1,5	2,0-4,5	40-90	<2,6	90-250
Epoksi	1,1-1,6	3,0-6,0	28-100	1-6	100-200
Vinil Ester	1,2-1,4	3,1-3,8	69-86	4-7	86
Fenolik	1,29	2,8-4,8	35-62	1,5-2,0	210-360



Gambar 3 Klasifikasi polimer sebagai matriks pada komposit serat alami.

Termoplastik adalah polimer yang melunak/meleleh jika dipanaskan dan kembali mengeras jika didinginkan. Beberapa contoh polimer termoplastik adalah Nilon, Polistiren (PS), Polipropilen (PP), Polietilen (PE), Polikarbonat (PC), Polivinil klorida (PVC), dan Akrilonitril butadiena stirena (ABS). Salah satu keunggulan utama termoplastik adalah dapat didaur ulang. Gowda *et al.* (2018) mentabelkan beberapa karakteristik utama polimer

termoplastik dari penelitian-penelitian sebelumnya, di antaranya ditunjukkan pada Tabel 3 (Gowda *et al.*, 2018).

Tabel 3 Beberapa karakteristik utama matriks termoplastik

Termoplastik	Densitas (g/cm^3)	Modulus Tarik (GPa)	Kuat Tarik (MPa)	Temperatur Leleh (°C)
Polipropilen (PP)	0,9-0,91	1,1-1,6	20-40	175
Polietilen (PE)	0,91-0,95	0,3-0,5	25-45	115
Polivinil klorida (PVC)	1,38	3,0	53	212
Polistiren (PS)	1,04-1,05	2,5-3,5	35-60	240
PP densitas tinggi	0,94-0,97	0,5-1,1	30-40	137

Karena termoplastik melunak jika dipanaskan dan dapat meleleh, maka termoplastik dapat dibentuk ulang dengan menuangkan lelehan resin termoplastik ke dalam cetakan. Mengingat temperatur lelehnya yang rendah, termoplastik tidak dapat digunakan pada temperatur tinggi.

3 KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI DENGAN MATRIKS POLIMER

3.1 Perkembangan Komposit Berbasis Serat Alami

Setelah era komposit modern berkembang pesat hingga sekitar tahun 2000, muncul kebutuhan baru, yaitu bahan yang lebih ramah lingkungan. Alternatif bahan yang tidak menimbulkan polusi adalah bahan yang berasal dari alam itu sendiri. Kondisi ini memicu perkembangan pesat pada penelitian dan pengembangan NFC.

Serat alami tumbuhan sangat banyak jenisnya, demikian juga dengan jenis resin. Secara teoritis suatu komposit dapat dibuat dengan mengombinasikan serat alami tertentu dengan resin tertentu. Dengan demikian banyak sekali jenis NFC yang dapat dikembangkan. Berbagai NFC telah dipelajari dengan berbagai serat tumbuhan dan matriks polimer baik termoset maupun termoplastik. Contoh beberapa jenis serat dan matriks untuk pengembangan NFC ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Contoh serat dan matriks pada NFC

No	Serat	Matriks
1	Serat daun nenas, sekam padi	Epoksi (termoset)
2	Serat daun, biji, buah	Fenolik (termoset)
3	Serat sisal, bambu	Poliester (termoset)
4	Serat kelapa	PP (termoplastik)
5	Serat daun nenas	PE (termoplastik)
6	Kayu, bambu	PVC (termoplastik)

Meskipun suatu NFC dibuat menggunakan jenis serat dan matriks yang sama, namun kualitas/karakteristik komposit yang dihasilkan belum tentu sama. Hal ini dikarenakan kualitas komposit bergantung pada kualitas serat dan proses pembuatannya. Karakteristik serat dipengaruhi oleh daerah asal, cuaca, proses penumbuhan, umur tumbuhan dan proses persiapan serat. Sedangkan pengaruh dari proses pembuatan serat bukan hanya dari tahapan pembuatannya, tetapi juga teknologi dan peralatan yang digunakan.

Komitmen negara-negara untuk mengurangi pemakaian material yang menimbulkan limbah bagi lingkungan mendorong pengembangan material yang lebih ramah lingkungan, khususnya yang dapat terurai secara hayati

(Czapla *et al.*, 2021). Oleh karena itu banyak studi dilakukan untuk mengembangkan "komposit hijau" yang dibuat dengan serat alami dan matriks yang berasal dari alam (non-petrokimia) yang dikenal sebagai *bio-based resin*. Beberapa contoh *bio-based resin* adalah: PLA, PHA (*polyhydroxyalkanoates*), Selulosa, Pati (*starch*). Resin-resin tersebut bersifat sepenuhnya *degradable*. Sebagai catatan, resin yang berasal dari pertokimia seperti polipropilen dan poliester bersifat *degradable* sebagian (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020).

Saat ini para peneliti juga mulai tertarik untuk mengembangkan NFC yang melibatkan nanomaterial (nanokomposit). Pada nanokomposit, setidaknya ada satu komponen komposit yang berukuran nano meter (10^{-9}m) baik dalam bentuk 1D, 2D, atau 3D. Nanokomposit diyakini memiliki karakteristik yang lebih baik dari komposit biasa.

3.2 Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Berbasis Serat Alami

Ada beberapa aspek penting dalam persiapan pembuatan komposit, yaitu: homogenitas, porositas, ikatan serat-matriks. Campuran serat dan matriks yang homogen menghasilkan komposit dengan karakteristik yang sama di semua bagian. Kehadiran porositas pada komposit diakibatkan oleh udara yang terperangkap dalam campuran. Porositas menyebabkan kekuatan mekanis komposit yang dihasilkan menurun. Namun di sisi lain material berpori mempunyai sifat meredam bunyi sehingga adakalanya kehadiran pori memang dibutuhkan. Kekuatan ikatan fiber dengan matriks dalam komposit adalah faktor utama pembentukan komposit. Dengan data yang dapat diperoleh dari berbagai literatur, dimungkinkan untuk memilih matriks yang sesuai untuk serat tertentu.

Beberapa faktor lain yang perlu diperhatikan dalam proses pembuatan komposit serat alami adalah kelembaban, jenis serat, fraksi volume, jenis serat, dan temperatur (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020). Komposit yang menggunakan matriks termoplastik memerlukan temperatur tertentu yaitu ketika resin telah meleleh. Namun serat tumbuhan dapat terdegradasi pada temperatur sekitar 200 °C sehingga pemilihan temperatur proses pembuatan tidak boleh terlalu tinggi. Dalam keadaan cair, selanjutnya campuran fiber-matriks dicetak sebelum didinginkan. Teknik pembuatan komposit dengan

resin termoplastik di antaranya adalah cetakan kompresi, cetakan lembaran, cetakan injeksi dan cetakan ekstrusi.

Komposit dengan resin termoset diproses dengan teknik pemrosesan sederhana seperti *lay-up* tangan (*hand lay up*). Pada proses *lay-up*, serat disusun secara manual misalnya dalam susunan lapisan-lapisan kemudian resin dituang ke susunan tersebut. Untuk ukuran serat yang kecil (beberapa mm), dapat dilakukan pencampuran resin dengan serat terlebih dahulu sebelum dilakukan pengempaan panas. Pada pemberian tekanan dan temperatur tinggi terjadi proses *curing* (pengeringan dan pengerasan, atau polimerisasi) dari matriks resin pada komposit. Penggunaan tekanan dan temperatur tinggi dapat menghasilkan komposit yang kompak dengan densitas tinggi.

Pada skala laboratorium, komposit berbasis serat alami dapat dibuat dengan teknik pencampuran sederhana antara serat dengan matriks sebelum dilakukan pengempaan panas. Hal penting yang perlu diperhatikan pada proses pencampuran adalah homogenitas campuran dan pengaturan/pengurangan rongga udara yang terperangkap. Kedua hal tersebut pada praktiknya tidak selalu mudah untuk dicapai karena kekentalan perekat yang sangat tinggi. Semakin tinggi homogenitas campuran, semakin baik komposit yang dihasilkan. Pada umumnya kita menginginkan komposit tanpa rongga udara, namun untuk aplikasi penyerap suara, justru dibutuhkan rongga udara di dalam komposit.

Contoh tahapan pembuatan komposit berbasis serat alami di laboratorium ditunjukkan pada Gambar 4. Pada contoh ini papan komposit dibuat dengan serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan perekat urea formaldehida. Serat disiapkan dari TKKS yang merupakan limbah perkebunan kelapa sawit, dengan perendaman berulang dalam NaOH.

Sifat fisis menggambarkan respons material ketika menerima perlakuan fisis seperti mendapat beban mekanis atau mendapat perlakuan panas. Untuk mempelajari struktur dan sifat fisis dari suatu material diperlukan karakterisasi yang sesuai. Mayoritas penggunaan serat alami dalam pengembangan NFC adalah sebagai komponen penguat. Oleh sebab itu karakterisasi yang sangat umum digunakan adalah uji mekanis misalnya uji tarik, uji tekan, dan uji puntir. Hasil uji tarik/tekan menggambarkan tingkat kekakuan bahan (modulus elastisitas), kekuatan (tarik/tekan), duktilitas, dan

strain pada saat rusak. Modulus elastisitas bahan yang diperoleh dari uji tarik dapat berbeda dengan yang diperoleh dari uji tekan.

Gambar 4 Rangkaian pembuatan komposit serat alami (disarikan dari Taangga, 2013)

Ketahanan termal dari NFC penting untuk diketahui agar rentang temperatur penggunaannya dapat ditentukan. Ketahanan termal diuji dengan pengamatan repons bahan ketika dipanaskan. Beberapa uji termal yang dikenal adalah TGA (*Thermogravimmetry analysis*), DTA/DSC (D*ifferential Thermal Analysis/Differential Scanning Calorimetry*), dan DMTA (*Dynamic Mechanical Thermal Analysis*). TGA mengukur pengurangan massa sampel ketika dipanaskan. Berkurangnya massa berkaitan dengan peristiwa fisika atau kimia yang terjadi pada sampel. DTA/DSC dapat mengukur jumlah kalor (atau kapasitas kalor) yang diserap atau dilepas oleh sampel ketika sampel mengalami proses fisika atau kimia. Jelaslah bahwa pengukuran TGA dan DTA/DSC berkaitan dengan peristiwa yang sama pada sampel sehingga seringkali pengukuran berlangsung secara bersamaan.

DMTA adalah metode analisis termal yang digunakan untuk mengkarakterisasi gerakan molekuler dalam polimer melalui pengukuran sifat mekanik dinamisnya seperti modulus penyimpanan (*storage modulus*) dan modulus kehilangan (*loss modulus*) pada rentang temperatur tertentu. Dalam pengujian geser (*shear*) DMTA, sampel dikenai *stress* atau *strain sinusoidal*. Bahan yang bersifat elastis murni memberikan respons *stress-strain in phase* (sefasa), sementara bahan yang bersifat viskos murni memberikan respons *stress-strain out in phase* (fase regangan tertinggal dari fase tegangan

sebesar 90°). Untuk bahan polimer yang umumnya bersifat visko-elastis, nilai beda fasa antara *stress* dan *strain* antara 0° dan 90°.

Sifat fisis yang ditunjukkan oleh material berkorelasi dengan strukur mikroskopisnya. Struktur material dapat diamati dengan menggunakan mikroskop, jika ingin mempelajari gambaran struktur yang lebih detail, dapat dilakukan pengamatan Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil pengamatan SEM menunjukkan kontur permukaan material.

Di samping sifat fisis, NFC juga memiliki sifat kimia yang menggambarkan bagaimana NFC berinteraksi secara kimia dengan lingkungannya. Sifat ini dipengaruhi oleh kandungan serat dalam NFC, sehingga dalam mempelajari sifat kimia NFC perlu dilakukan uji kandungan serat. Setiap jenis serat memiliki komposisi kandungan serat (selulosa, lignin, hemiselulosa, piktin, air, wax, microfibrillar) yang berbeda-beda (Hoque *et al.*, 2021).

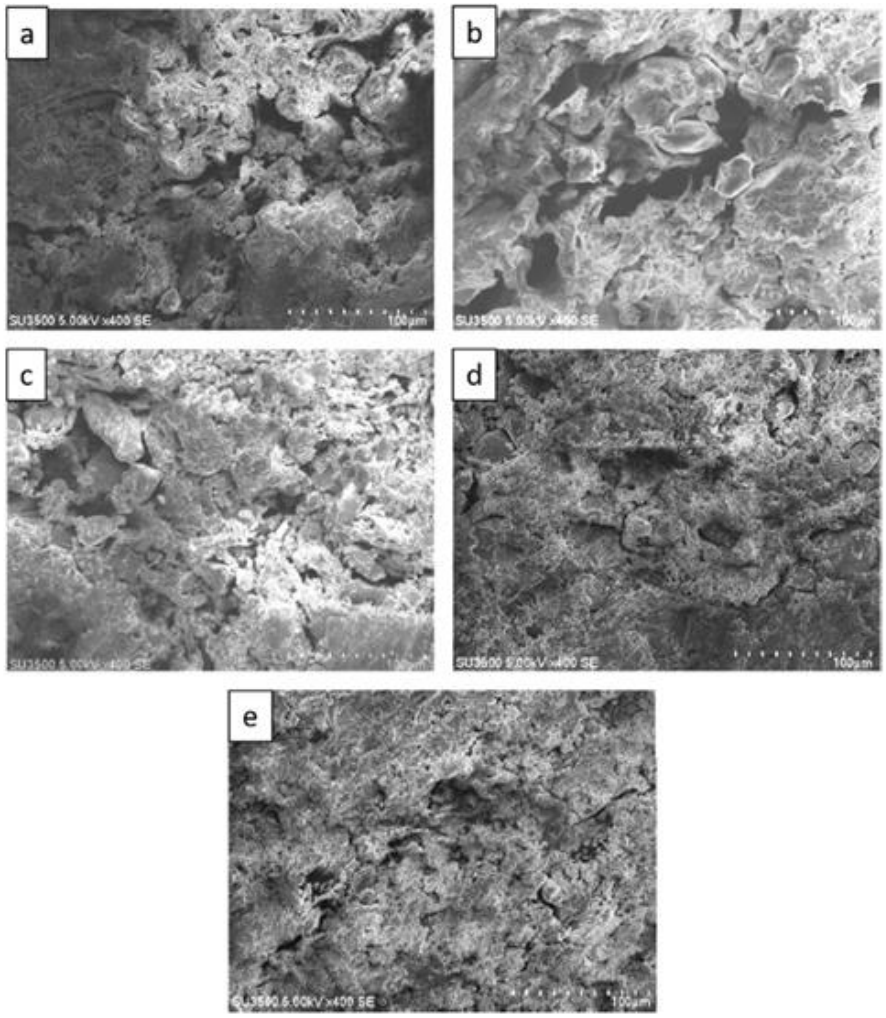
Selain itu, untuk memberi gambaran mengenai kemampuan NFC untuk dapat terurai secara hayati, diperlukan uji biodegradabilitas. Material yang bersifat *biodegradable* memiliki kemampuan terdegradasi oleh mikroorganisme. Mikroorganisme dapat tumbuh pada material *biodegradable*. Pertumbuhan mikroorganisme itu mengakibatkan munculnya lubang dan retakan sehingga mengakibatkan menurunnya kekuatan mekanis NFC. Proses ini berlangsung hingga material terdegradasi sempurna dan menyatu dengan tanah. Tingkat biodegradabilitas NFC dipengaruhi oleh komposisi komponen pembentuknya. Semakin besar fraksi serat alami, semakin tinggi tingkat biodegradabilitas NFC. Salah satu cara uji tingkat biodegradabilitas adalah dengan memendam material dalam tanah lalu diamati lama waktu berkurangnya massa.

3.3 Sifat Fisis Komposit Berbasis Serat Alami

Morfologi dan Densitas

Tampilan NFC serupa dengan tampilan komposit serat sintetis dan tergantung pada jenis, ukuran dan persebaran serat. Jenis serat yang berbeda dapat mempunyai warna dan bentuk yang berbeda. Banyak jenis serat yang dapat dibuat sangat kecil sehingga berbentuk partikel/butiran, namun ada pula yang bersifat lentur sehingga sulit dibuat seperti partikel butiran. Biasanya serat

seperti ini dibuat berukuran beberapa mm dengan mengunakan alat potong seperti gunting. Ukuran serat dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Persebaran serat biasanya diharapkan merata agar karakteristik komposit yang dihasilkan bersifat homogen.

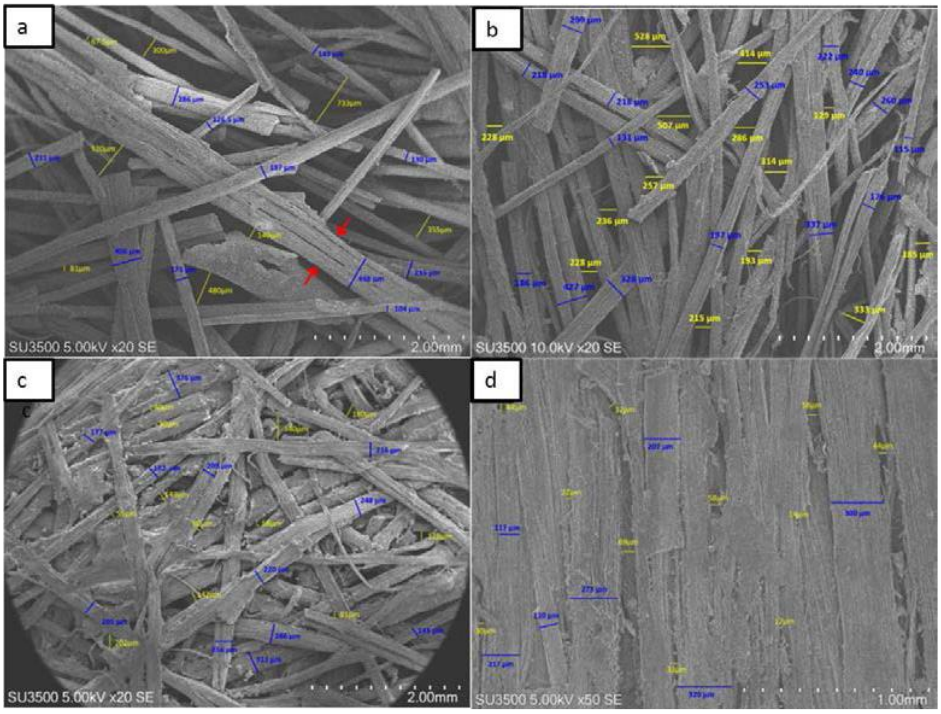


Gambar 5 Gambar SEM komposit serat sagu pada berbagai fraksi epoksi (% wt): (a) E9, (b) E13, (c) E17, (d) E20 dan (e) E23 (Widayani *et al*., 2019).

Seperti pada material lainnya, struktur mikroskopis NFC memengaruhi sifat makroskopiknya. Struktur mikroskopis diamati dengan SEM. Pengujian SEM pada NFC dapat memberi gambaran homogenitas sebaran serat, keberadaan rongga (mikro) serta dimensinya. Struktur mikroskopis NFC dipengaruhi oleh proses pembuatan serta ikatan antara serat dan matriks.

Pada proses pembuatan NFC sering kali udara terperangkap dalam campuran serat-matriks sehingga menghasilkan rongga udara dalam komposit. Pada komposit serat sagu-epoksi, rongga udara yang terperangkap membentuk pori yang ukurannya menurun seiring dengan bertambahnya fraksi matriks seperti ditunjukkan pada Gambar 5 (Widayani *et al.*, 2019). Komposit tersebut dibuat dengan variasi fraksi matriks dari 9 % (sampel E9) hingga 23 % (sampel E23) (Sutrisno *et al.*, 2019).

Keberadaan pori diperlukan pada komposit yang ditujukan untuk aplikasi sebagai bahan penyerap bunyi karena bahan berpori menyerap bunyi lebih baik daripada bahan tanpa pori. Pada studi mengenai karakteristik penyerapan bunyi pada komposit serat daun nanas-epoksi, dilakukan pula pengamatan SEM pada komposit yang dihasilkan. Gambar 6 menunjukkan hasil pengamatan SEM yang menggambarkan morfologi komposit yang mengandung pori. Ukuran pori dipengaruhi oleh nilai tekanan pada proses pembuatannya, di mana tekanan yang lebih tinggi menghasilkan ukuran pori yang lebih rendah (Adhika *et al.*, 2020).



Gambar 6 Morfologi komposit serat daun nanas – epoksi dengan tekanan pembuatan yang berbeda: a) sampel 1A (23,15 kN/m^2), b) sampel 1B (24,71 kN/m^2), c) sampel 2 (69,44 kN/m^2), d) sampel 3 (115,74 kN/m^2). Garis kuning dan biru menunjukkan ukuran pori dan diameter serat. (Adhika *et al*., 2020).

Densitas merupakan sifat fisis yang sangat penting bagi komposit dan menjadi salah satu pertimbangan dalam pemilihan komposit dalam aplikasi tertentu, misalnya sebagai material struktur. NFC memiliki kekuatan mekanis memadai namun mempunyai densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan komposit serat sintetis sehingga NFC dapat menggantikan komposit serat sintetis.

Secara teoretis, densitas dari dua zat berbeda yang bercampur tergantung pada fraksi volume masing-masing bagian. Jika tidak ada porositas dan tak ada perubahan densitas fiber dan matriks, maka densitas komposit dapat dihitung menggunakan *rule of mixture*:

$$\rho_{komposit} = \frac{V_{fiber}}{V_{komposit}} \rho_{fiber} + \frac{V_{matriks}}{V_{komposit}} \rho_{matriks} \quad (1)$$

Dengan menggunakan *rule of mixture,* densitas suatu komposit dapat diprediksi yaitu dengan mengatur fraksi komponen komposit. Selain densitas, beberapa besaran fisis komposit lain seperti modulus elastisitas dan kapasitas panas juga dipengaruhi oleh nilai besaran fisis terkait untuk masing-masing komponennya serta fraksi dari serat/matriks. Untuk itu beberapa besaran fisis tersebut pada komposit juga dapat diprediksi dengan *rule of mixture*.

Beberapa studi sebelumnya mengenai NFC yang ditujukan untuk aplikasi papan komposit menunjukkan bahwa densitas dipengaruhi oleh komposisi serat/matriks. Studi mengenai papan komposit dengan matriks epoksi dan beberapa jenis serat berikut telah dilakukan: partikel kulit kakao (Panjaitan, 2013), sekam padi (Farizi, 2014), dan ampas sagu (Rahayu, 2014). Hasil studi menunjukkan bahwa densitas komposit dengan partikel kulit kakao (9,1-16,7) % *wt* matriks, sekam padi (15-25) % *wt* matriks, ampas sagu (9-23) % *wt* matriks, bervariasi dalam rentang (0,87-1,06; 0,71-0,77; 0,92-1,12) g/cm^3.

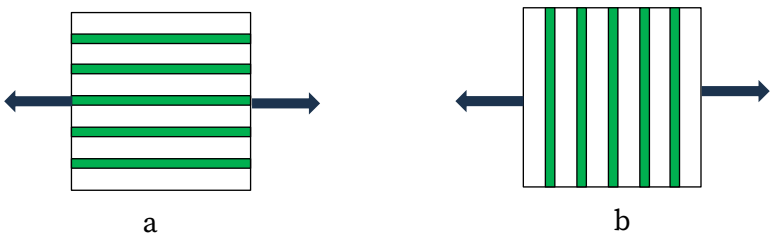
Selain dipengaruhi oleh komposisi serat/matriks, densitas NFC juga dipengaruhi oleh proses pembuatannya. Tekanan tinggi diperlukan untuk menghasilkan komposit yang kompak dengan ikatan yang baik antara serat dan matriks serta mengurangi porositas. Semakin tinggi tekanan, semakin besar densitas komposit yang dihasilkan. Sebagai contoh, komposit serat daun nanas-epoksi yang dibuat dengan variasi tekanan dalam rentang (23,15-115,74) kN/m^2 menghasilkan komposit dengan densitas yang meningkat

seiring meningkatnya tekanan, dalam rentang (0,258-0,907) g/cm^3 (Adhika *et al.*, 2020).

Sifat Mekanis

Sifat mekanis komposit menggambarkan kemampuan komposit dalam menerima beban luar. Suatu bahan dapat mengalami beban luar seperti beban tarik, tekan, geser dan puntir pada saat digunakan. Sifat mekanis bahan dipelajari dengan melakukan uji mekanis. Uji tarik dan uji tekan menghasilkan modulus elastisitas (tarik, tekan), kuat tarik/tekan dan strain pada saat rusak. Uji puntir ditujukan bagi bahan yang akan mengalami beban geser. Dari uji puntir dapat diketahui beberapa besaran seperti modulus geser dan kekuatan luluh puntir.

Modulus elastisitas menggambarkan ukuran kekakuan bahan. Modulus elastisitas bahan komposit dipengaruhi oleh komposisi serat/matriks dan susunan serat. Ada dua formula dasar untuk memprediksi modulus elastisitas komposit yaitu formula Voigt dan Reuss yang dapat diturunkan berdasarkan model komposit serat lurus dengan beban tarik yang searah dan tegak lurus serat.



Gambar 7 Model komposit (a) Voigt, (b) Reuss.

Rumus Voigt diturunkan dengan menggunakan kondisi isostrain:

$$E\varepsilon = \sigma$$

$$E\varepsilon = \sigma_m(1-f) + \sigma_f f$$

$$E = \frac{\sigma_m}{\varepsilon}(1-f) + \frac{\sigma_f}{\varepsilon} f$$

$$E = E_m(1-f) + E_f f \qquad (2)$$

di mana E, E_f, E_m dan f berturut-turut adalah modulus Young komposit, modulus Young serat, modulus Young matriks, dan fraksi serat.

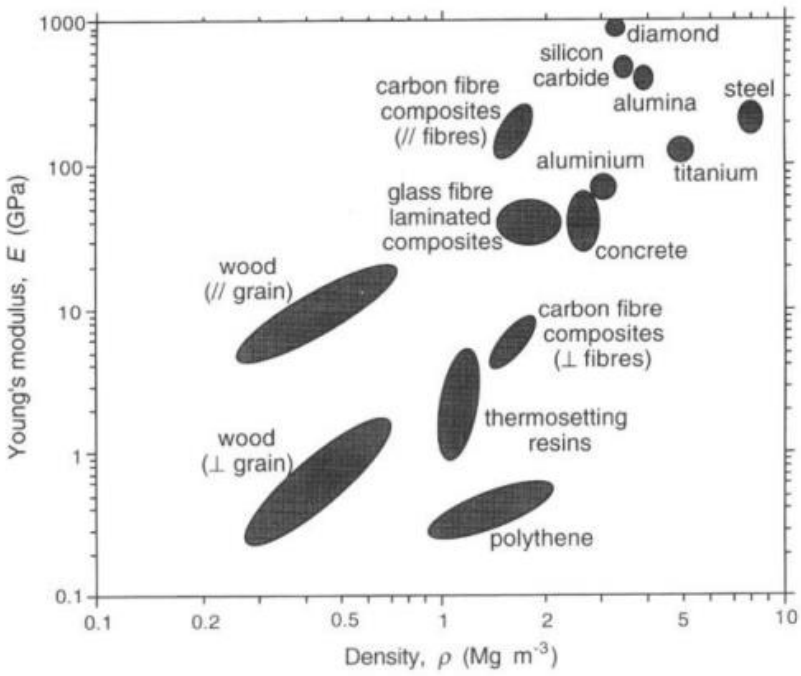
Rumus Reuss diturunkan dengan menggunakan kondisi isostress:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{(1-f)\varepsilon_m + f\varepsilon_f} = \frac{\sigma}{(1-f)\frac{\sigma}{E_m} + f\frac{\sigma}{E_f}}$$

$$E = \frac{E_m E_f}{(1-f)E_f + fE_m} \tag{3}$$

Rumus Voigt dan Reuss memberi batas maksimum dan minimum dari modulus elastisitas komposit.

Nilai modulus Young material komposit berkorelasi dengan densitasnya. Pemetaan Modulus Young material komposit terhadap densitas pada Gambar 8 memberi gambaran nilai modulus Young untuk berbagai jenis komposit (Hull & Clyne, 1996). Dari gambar tersebut nampak bahwa modulus Young dan densitas untuk komposit dengan serat tumbuhan bernilai relatif kecil dibandingkan dengan komposit dengan serat karbon atau logam.



Gambar 8 Pemetaan modulus Young terhadap densitas pada material komposit (Hull & Clyne, 1996).

Tabel 5 menunjukkan hasil studi terhadap sifat mekanis dari beberapa NFC yang menunjukkan bahwa modulus elastisitas dipengaruhi oleh komposisi serat/matriks. Pada semua studi tersebut komposit dibuat dengan metode pencampuran antara fiber dan matriks, lalu diikuti dengan pemberian tekanan dan panas pada temperatur tertentu sebelum didinginkan pada temperatur kamar. Sebelum pencampuran, serat dikeringkan terlebih dahulu.

Tabel 5 Modulus elastisitas beberapa papan komposit

Serat	Matriks	Fraksi Matriks (FM) (%)	Modulus elastisitas (MPa)	Catatan	Referensi
Sekam padi	Epoksi	15-25	30,4-54,5	Minimum di FM 20%	Farizi & Widayani, 2014
Serat TKKS	Urea Formaldehida	1,96-5,66	0,73-1,19	Minimum di FM 3,85%	Taangga, 2013
Partikel kulit coklat	Epoksi	9,1-16,7	385-665	Minimum di FM 10,7%	Panjaitan, 2013
Limbah ampas sagu	Epoksi	9-23	168,52-283,77	Maksimum di FM 20%	Rahayu, 2014

Sifat Termal

Sifat termal suatu bahan berkaitan dengan respons bahan terhadap pemberian kalor dan perubahan temperatur. Seperti pada material lain, sifat termal direpresentasikan oleh besaran fisis termal seperti konduktivitas termal, koefisien muai, dan panas jenis. Studi tentang konduktivitas termal NFC dengan matriks resin epoksi menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal NFC rendah. Penggunaan serat tebu, kelapa dan katun menghasilkan konduktivitas termal dalam rentang 0,3-0,4 $Wm^{-1}K^{-1}$ (Hassan *et al.*, 2020). Di sisi lain, penggunaan serat *abaca* dan bambu menghasilkan konduktivitas termal dalam rentang 0,273-0,292 dan 0,307-0,317 $Wm^{-1}K^{-1}$ (Takagi *et al.*, 2014). Nilai konduktivitas NFC tersebut sangat rendah dibandingkan dengan nilai konduktivitas logam yang merupakan konduktor termal yang baik. Jelaslah bahwa NFC merupakan bahan isolator termal.

Baru-baru ini studi mengenai koefisien muai panjang NFC dengan serat kapas (katun) dan beringin telah dilakukan (Baladivakar *et al.*, 2023). Secara termal, selulosa kurang stabil dibandingkan dengan hemiselulosa dan lignin sehingga jika kandungan selulosa dalam serat lebih banyak, maka nilai koefisien muai panjang NFC lebih tinggi. Nilai koefisien muai panjang NFC dengan serat kapas ($3{,}40 \times 10^{-5}$/°C), lebih tinggi dibandingkan dengan serat

beringin ($1{,}81 \times 10^{-5}$/°C). Hal ini menunjukkan bahwa kandungan selulosa serat kapas lebih tinggi dibandingkan dengan serat beringin.

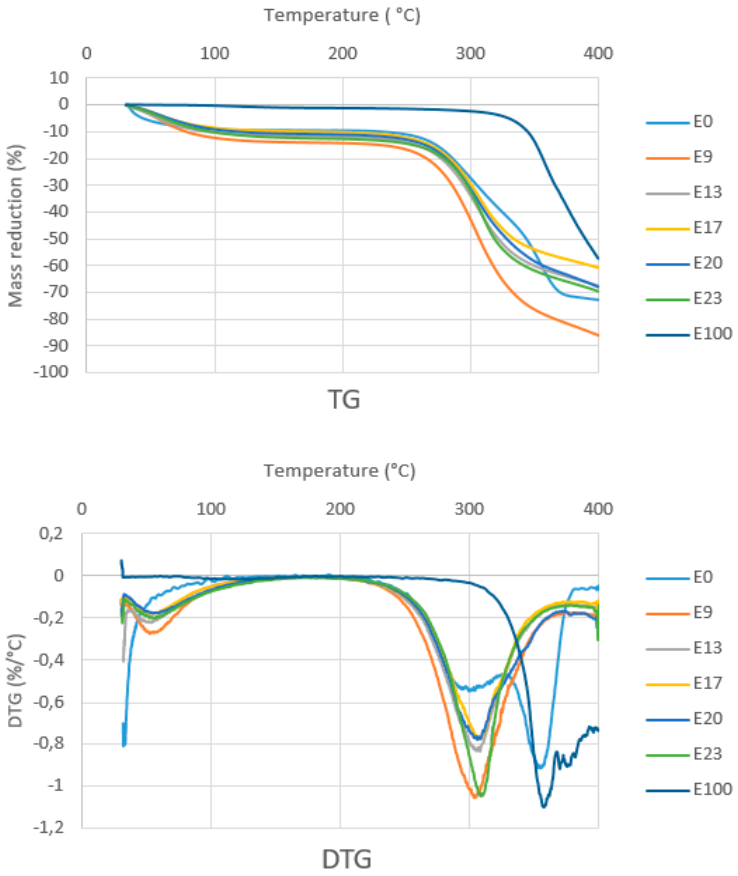
Kapasitas panas (C_p) adalah jumlah kalor yang diperlukan suatu zat untuk menaikkan temperaturnya sebanyak 1 °C. Jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur 1 °C per satuan massa disebut kapasitas panas jenis (c_p). *Rule of mixture* untuk kapasitas panas komposit diberikan pada Persamaan 4 berikut:

$$Cp_{komposit} = \frac{m_{fiber}}{m_{komposit}} Cp_{fiber} + \frac{m_{matriks}}{m_{komposit}} Cp_{matriks} \quad (4)$$

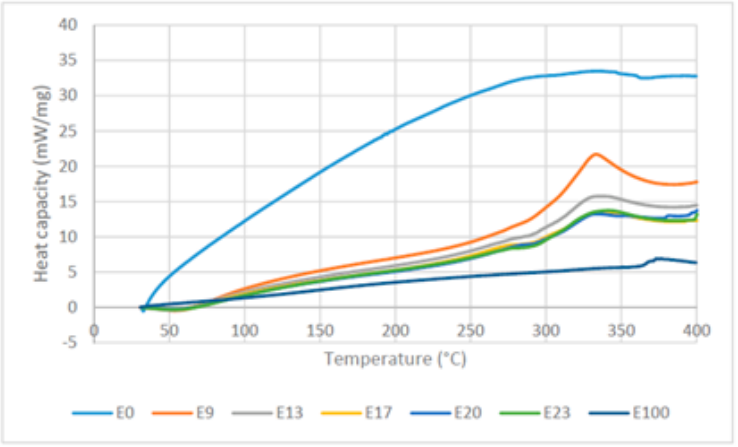
Analisis termal komposit diperlukan untuk mengetahui pada temperatur berapa suatu bahan komposit dapat digunakan tanpa terjadi kerusakan termal. Analisis termal dilakukan dengan pengukuran massa (TGA), dan laju aliran panas (DTA/DSC) selama pemanasan terprogram.

Kajian analisis termal pada NFC yang terbuat dari serat sagu dan matriks epoksi telah dilakukan dengan variasi fraksi matriks dari 9 % (sampel E9) hingga 23 % (sampel E23) (Sutrisno *et al.*, 2019). Hasil pengamatan TGA ditunjukkan pada Gambar 9. Penurunan massa pada awal pemanasan berkaitan dengan proses penguapan, di mana kandungan air dalam komposit menguap dan lepas ke udara sehingga mengakibatkan penurunan massa. Pada studi ini juga ditunjukkan bahwa serat mengalami proses penguapan sementara epoksi tidak. Jelaslah bahwa penguapan pada komposit berasal dari penguapan pada komponen serat.

Penurunan massa pada daerah temperatur lebih tinggi (>200 °C) berkaitan dengan dekomposisi serat sagu (hemiselulosa diikuti oleh selulosa), yang diikuti oleh dekomposisi resin epoksi. Kurva DTA pada Gambar 10 menunjukkan bahwa untuk komponen serat (E_0), komponen hemiselulosa dan selulosa pada serat sagu mengalami kerusakan dalam rentang 229,9–362,4 °C dan untuk komponen epoksi (E_{100}) kerusakan terjadi pada temperatur 352,2–396,1 °C. Kurva DTA untuk material komposit menunjukkan bahwa pada proses pemanasan, kerusakan komposit yang direpresentasikan dengan puncak eksoterm DTA diawali dengan dekomposisi serat alami, yaitu dekomposisi hemiselulosa dan selulosa, kemudian disusul dengan degradasi epoksi.



Gambar 9 Kurva TG dan DTG dari komposit serat sagu-epoksi untuk berbagai fraksi epoksi (Widayani *et al.*, 2019).

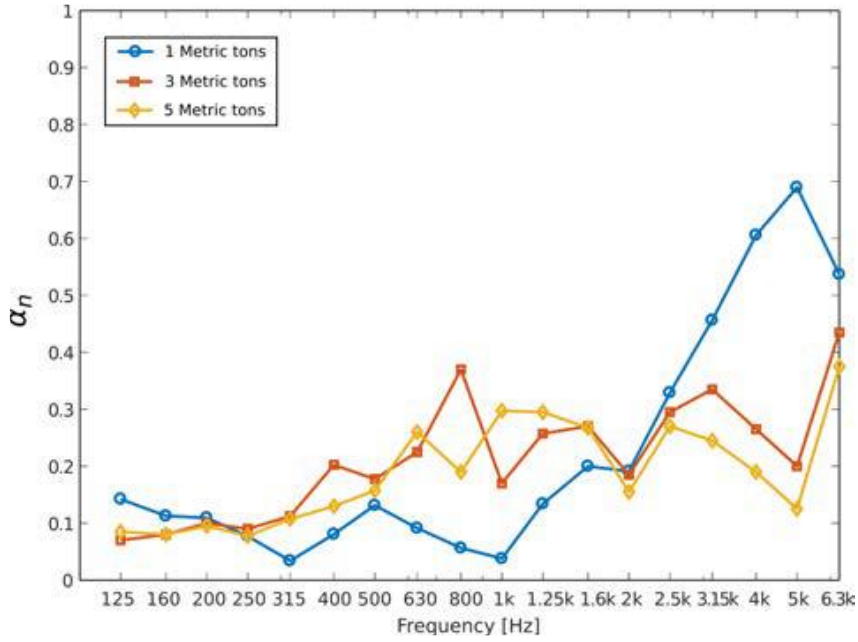


Gambar 10 Kurva DTA dari komposit serat sagu-epoksi untuk berbagai fraksi epoksi (Widayani *et al.*, 2019).

Beberapa kurva DTA untuk komposit menunjukkan fitur bahu. Fitur ini cenderung menghilang ketika kandungan epoksi semakin rendah. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi tumpang tindih pada area eksotermik antara kerusakan serat dan epoksi. Perubahan pola bahu pada kurva DTA kemungkinan terbentuk ketika serat mulai terdegradasi, yaitu terjadinya dekomposisi hemiselulosa, sehingga *baseline* epoksi tampak naik.

Penyerapan Suara

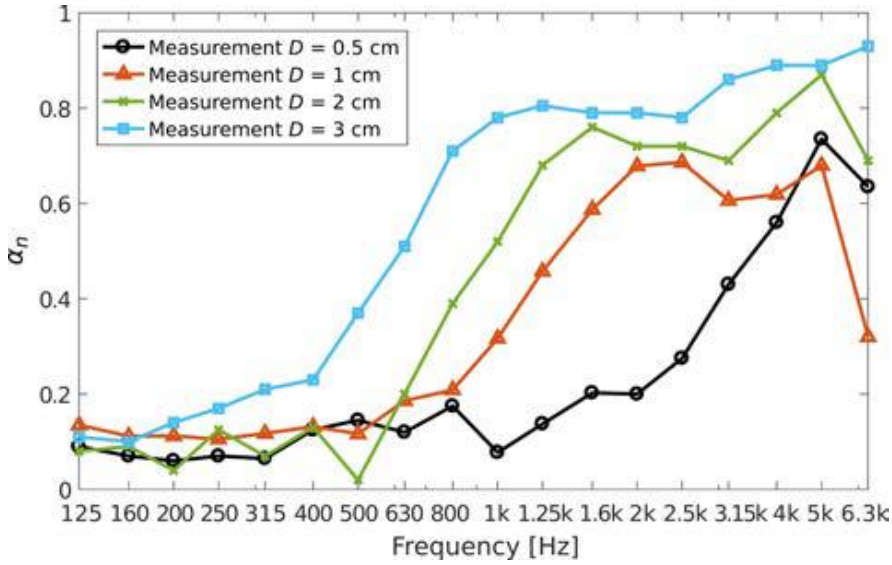
Salah satu karakteristik komposit yang banyak diteliti adalah karakteristik penyerapan suaranya. Pengembangan material penyerap suara menjadi penting karena tingkat kebisingan yang tinggi di banyak pemukiman baik di desa maupun kota sehingga dapat mengganggu kenyamanan bahkan kesehatan masyarakat. Struktur material yang baik untuk penyerapan suara adalah struktur material berpori. Tingkat kepadatan NFC dipengaruhi oleh komposisi dan tekanan pada saat pembuatannya. Tekanan yang rendah memungkinkan diperolehnya NFC yang mengandung pori dengan ukuran relatif lebih besar, namun penggunaan tekanan rendah memiliki kekurangan pula yaitu dapat menghasilkan komposit dengan homogenitas dan kekuatan mekanis yang rendah.



Gambar 11 Koefisien absorpsi suara panel komposit serat daun nanas-epoksi yang dibuat dengan tekanan berbeda-beda (Adhika *et al.*, 2020).

Studi mengenai penyerapan suara telah dilakukan untuk NFC yang dibuat dari serat daun nanas dengan matriks epoksi (Adhika *et al.*, 2020). Hasil studi menunjukkan bahwa kebergantungan koefisien absorpsi terhadap frekuensi berbeda untuk sampel yang dibuat dengan tekanan yang berbeda. Pada area frekuensi di atas 2 kHz, komposit yang dibuat dengan tekanan lebih rendah memiliki koefisien absorpsi yang lebih tinggi. Sebaliknya pada rentang frekuensi di bawah 2 kHz, komposit yang dibuat dengan tekanan lebih rendah cenderung menghasilkan komposit dengan koefisien absorpsi yang lebih rendah.

Adhika *et al.* (2020) juga mempelajari pengaruh tebal bahan NFC terhadap penyerapan suara. Variasi tebal bahan di antaranya dilakukan dengan membuat susunan berlapis. Koefisien absorpsi meningkat dengan bertambahnya ukuran tebal bahan. Secara umum fenomena ini terjadi untuk semua rentang frekuensi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.

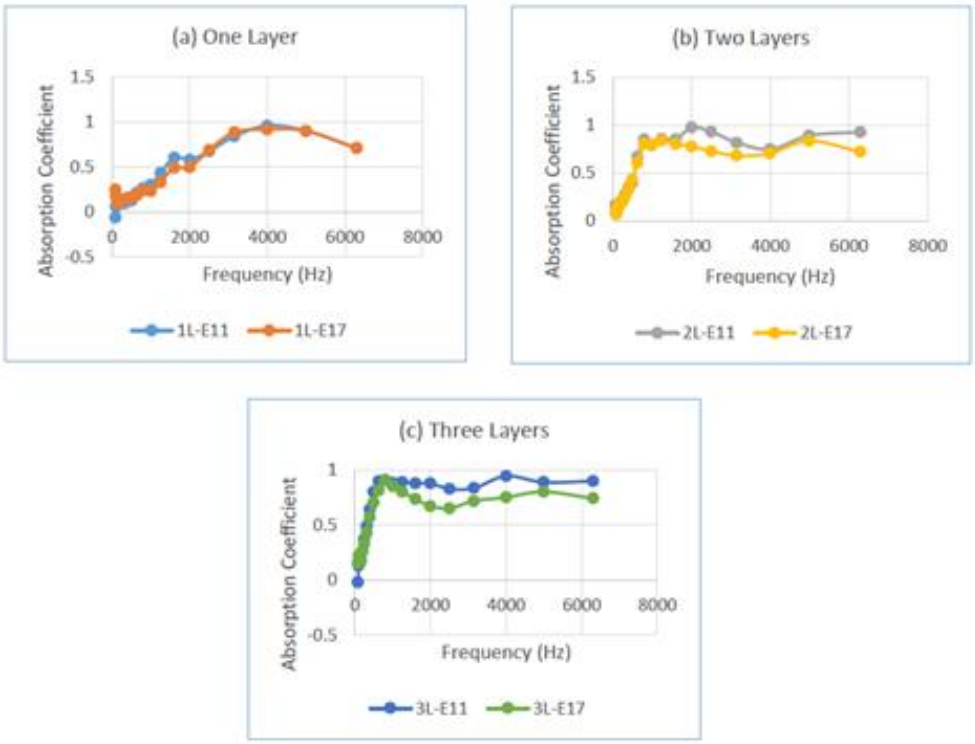


Gambar 12 Koefisien absorpsi suara panel komposit serat daun nanas-epoksi dengan ketebalan berbeda-beda: D = 0.5 cm, D = 1 cm, D = 2 cm, D = 3 cm (Adhika *et al.*, 2020).

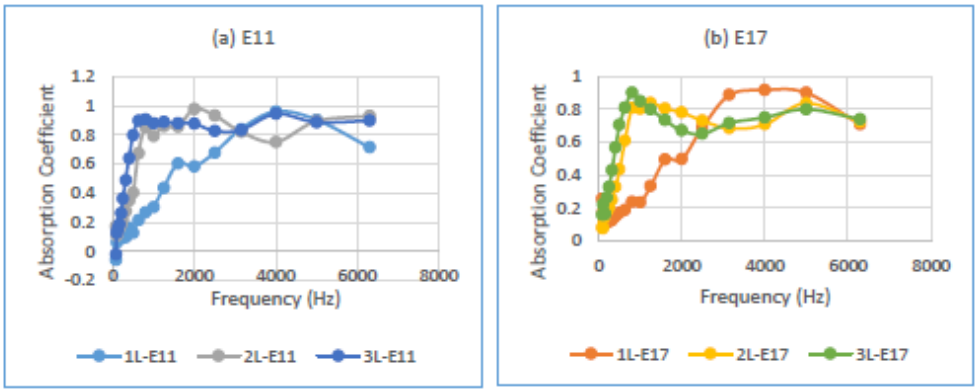
Studi lebih lanjut dilakukan untuk mempelajari pengaruh komposisi komponen dan juga jumlah lapisan dalam susunan berlapis terhadap koefisien absorpsi suara pada NFC yang terbuat dari serat daun nanas-epoksi (Widayani *et al.*, 2022). Hasil studi menunjukkan bahwa koefisien absorpsi suara dipengaruhi oleh konsentrasi epoksi dan jumlah lapisan. Gambar 13 (a) memperlihatkan bahwa pengaruh konsentrasi epoksi tidak nampak pada

susunan 1 lapis, hal ini dapat diakibatkan karena pemilihan variasi konsentrasi epoksi yang tidak berbeda jauh, yaitu 11 dan 17 %. Namun, pengaruh konsentrasi epoksi nampak untuk susunan 2 dan 3 lapis (Gambar 13 b-c) di mana komposit dengan kandungan epoksi lebih rendah (berarti kandungan serat daun nanas yang lebih tinggi) menunjukkan koefisien absorpsi yang lebih tinggi. Pori dalam komposit terutama berada di komponen serat, sehingga hasil ini menunjukkan korelasi antara koefisien absorpsi dengan kandungan pori.

Analisis koefisien absorpsi suara dilakukan pada dua rentang frekuensi berbeda, yaitu di atas dan di bawah 1 kHz. Pada rentang frekuensi di atas 1 kHz, NFC dengan konsentrasi epoksi lebih tinggi memberikan koefisien absorpsi suara yang lebih kecil.



Gambar 13 Koefisien absorpsi suara komposit serat daun nanas dengan kandungan epoksi 11 dan 17 % untuk susunan: (a) satu lapis, (b) dua lapis, (c) tiga lapis (Widayani *et al*., 2022).



Gambar 14 Koefisien absorpsi suara komposit serat daun nanas dengan kandungan epoksi 11 dan 17 % (Widayani *et al.*, 2022).

Pengaruh jumlah lapisan untuk setiap konsentrasi epoksi ditunjukkan pada Gambar 14. Nampak jelas bahwa pada rentang frekuensi <1 kHz, koefisien absorpsi meningkat dengan meningkatnya jumlah lapisan. Pada rentang frekuensi >1 kHz, koefisien absorpsi suara bervariasi, tetapi nilainya masih tinggi (di atas 0,6).

Berdasarkan hasil studi ini, dapat disimpulkan bahwa untuk komposit serat daun nanas-epoksi, penyerapan suara pada frekuensi rendah dipengaruhi oleh tebal bahan dan pada frekuensi tinggi dipengaruhi oleh komposisi/struktur material. Untuk memahami perbedaan mekanisme penyerapan suara oleh komposit pada rentang frekuensi berbeda, perlu kajian lebih lanjut.

4 APLIKASI KOMPOSIT BERBASIS SERAT ALAMI

Penggunaan material pada aplikasi tertentu utamanya ditentukan berdasarkan pemenuhan sifat fisis yang dibutuhkan pada aplikasi tersebut. NFC digunakan sebagai bahan pengganti/alternatif dari material yang biasa digunakan, sehingga selain pertimbangan sifat fisis, penentuan aplikasi NFC juga mempertimbangkan faktor lain seperti biaya, sustainabilitas, dan penampilan. Pengembangan NFC serta aplikasinya masih terus dipelajari, namun pada saat ini sudah banyak aplikasi NFC yang dikenal, seperti pada uraian berikut ini.

4.1 Material Struktur

Material yang digunakan dalam aplikasi struktur harus mampu mendukung berat struktur atau tahan terhadap tumbukan/dampak energi sehingga struktur terhindar dari kerusakan. Material struktur memerlukan karakteristik mekanis tertentu seperti kemampuan menahan beban tarik, beban tekan, beban impak serta sifat yang memenuhi persyaratan aplikasi.

Penggunaan NFC sebagai material struktur mencakup bidang konstruksi, otomotif, pesawat/kapal. Dalam bidang konstruksi, pengembangan komposit beton dengan berbagai serat alami seperti serat kelapa, bambu dan sisal ditujukan untuk menggantikan penggunaan logam seperti besi yang memiliki kelemahan, yaitu dapat berkarat.

4.2 Komponen Otomotif

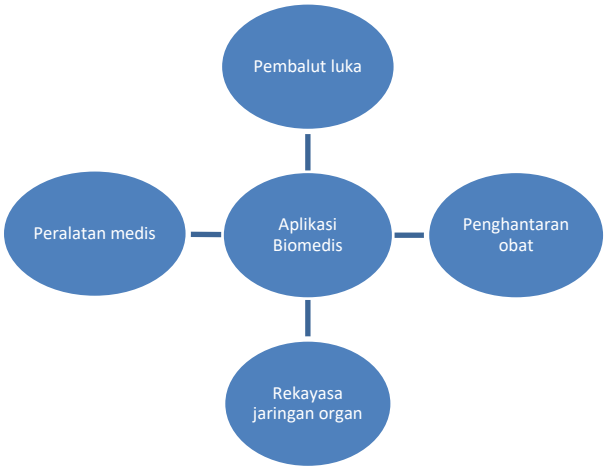
Ada dua aspek utama yang memicu pengembangan aplikasi NFC dalam dunia otomotif, yaitu isu keselamatan lingkungan dan kebutuhan kendaraan yang lebih ringan sehingga lebih hemat bahan bakar, tetapi tetap aman. Dua aspek tersebut dapat dipenuhi oleh NFC karena NFC bersifat *biodegradable* dan juga lebih ringan karena serat alami lebih ringan daripada logam pada umumnya serta NFC dibuat menggunakan matriks polimer. Hal ini berdampak besar pada massa kendaraan khususnya jika penggunaan komposit berbasis serat alami diterapkan pada banyak bagian otomotif. Penggunaan NFC juga dinilai aman bagi kesehatan manusia. Tentu saja sifat mekanis NFC pun mendukung aplikasinya dalam bidang otomotif.

Contoh komponen otomotif berbahan NFC adalah panel pintu, penutup mesin dan kotak roda gigi, panel bagian bawah bodi mobil, bagian dalam pilar, pelapis kepala, rak kargo belakang, komponen bagasi, dan insulasi termal (Naik *et al.*, 2022). Beberapa jenis serat tumbuhan yang telah digunakan dalam pengembangan komponen otomotif di antaranya adalah serat katun, kenaf, dan kelapa.

Meskipun penggunaan NFC sebagai komponen otomotif semakin berkembang, namun ada karakteristik serat alami yang menjadi tantangan yang perlu dihadapi seperti mudah menyerap air, daya tahan yang kurang baik dan lemahnya ikatan antara serat dan matriks.

4.3 Biomedis

Pemanfaatan NFC dalam bidang biomedis meliputi beberapa aplikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15. Selulosa memiliki sifat nontoksik, *biodegradable, biocompatibility,* dan biomekanis yang baik sehingga dapat digunakan dalam dunia pengobatan/biomedis. Karena NFC memiliki sifat *biodegradable* dan *biocompatibility*, maka NFC dapat digunakan sebagai bahan rekayasa jaringan organ dan pengiriman obat. Pada proses pengobatan, proses pengiriman obat pada area tertentu dalam tubuh dilakukan secara efektif dengan menggunakan bio nano komposit. Selain efektif dalam laju pelepasan obat melalui difusi-erosi bio nano komposit, penggunaannya juga aman dan efektif dari segi biaya.



Gambar 15 Aplikasi NFC dalam bidang biomedis.

Biokomposit juga digunakan sebagai pembalut luka. Salah satu biokomposit yang baik untuk pembalut luka adalah biokomposit yang berbasis kitosan karena kitosan menunjukkan sifat antioksidan dan anti inflamasi. Kitosan adalah polisakarida alami yang berasal dari cangkang hewan seperti udang, kepiting dan kerang (Hoque *et al.*, 2021).

4.4 Material Bangunan / Arsitektur

Material untuk bangunan sangat banyak jenisnya. Komponen material bangunan mencakup struktur, panel, dinding, jendela/pintu, dan sebagainya. Berbagai serat alami telah digunakan dalam pengembangan komposit untuk komponen bangunan (Domke & Mude, 2015). Beberapa contohnya ditampilkan pada Tabel 6.

Di samping itu, NFC juga digunakan sebagai bahan lantai. Pemilihan bahan lantai bukan hanya berdasarkan sifat fisisnya yang harus memenuhi pesyaratan tertentu, tetapi juga tampilannya harus menarik karena dapat memengaruhi keindahan ruang. Sebagai bahan lantai, NFC sudah sangat memasyarakat, misalnya *wood plastic composite* (WPC). Selain memiliki sifat fisis yang memenuhi persyaratan untuk lantai seperti tidak menyerap air dan tahan terhadap beban tekan, WPC memiliki tampilan yang cantik dan mendekati tampilan lantai kayu asli. Lantai WPC sudah tersedia secara komersial.

Tabel 6 Contoh pemanfaatan serat alami pada komponen bangunan

Serat	***Komponen bangunan***
Bambu dan komposit bambu	Atap
Serat sisal	Lembaran atap
Sekam padi	Papan semen dan gipsum
Jerami	Papan serat kepadatan menengah, papan partikel papan jerami, jerami, papan berikat semen, atap jerami, dan sebagainya.
Kulit kacang tanah	Panel bangunan, blok bangunan, untuk membuat papan *chip*, lembaran atap, papan partikel.
Batang kapuk	Papan serat, panel, penutup pintu, lembaran atap, komposit semen yang diautoklaf, kertas, plesteran dinding.

4.5 Furnitur

Penggunaan papan kayu telah lama menjadi perhatian karena persediaan kayu di hutan semakin menipis. Pohon jati dan mahoni yang menghasilkan

papan kayu dengan kualitas baik, memerlukan waktu tanam yang lama sebelum dipanen. Untuk menghindari berkurangnya tanaman kayu di hutan, budidaya tanaman kayu yang waktu tanamnya lebih singkat diharapkan dapat memenuhi kebutuhan papan kayu.

Kini, pengembangan papan partikel perlahan mulai menggantikan penggunaan papan kayu dalam pembuatan furnitur seperti lemari pakaian, meja dan kursi. Papan partikel menggunakan partikel kayu yang direkatkan dengan perekat. Kekuatan papan partikel dipengaruhi oleh banyak hal di antaranya jenis partikel kayu yang digunakan serta proses pabrikasinya. Meskipun kekuatan mekanis papan partikel dapat bersaing dengan papan kayu, namun papan partikel lebih tidak tahan dalam lingkungan lembab/berair, sehingga papan partikel digunakan pada area yang tidak lembab/berair.

Penampilan furnitur papan partikel tidak kalah menarik dengan furnitur yang terbuat dari kayu asli. Apalagi kini tersedia pelapis dengan tekstur dan gambar menyerupai guratan papan kayu asli. Sebagai tambahan, furnitur papan partikel berbobot lebih ringan dari kayu asli.

Dengan banyaknya penggunaan papan partikel secara komersial, kini kualitas papan partikel telah tertuang dalam standar. Untuk Indonesia, standar untuk papan partikel adalah SNI 03-2105-2006. Sifat mekanis yang disyaratkan pada standar ini meliputi Keteguhan lentur minimum (kgf/cm^2), Modulus elastisitas lentur (kering) minimum (104 kgf/cm^2), Keteguhan tarik tegak lurus permukaan minimum (kgf/cm^2), dan Keteguhan cabut sekrup minimum (kgf). Secara lengkap standar ini mensyaratkan aspek lain seperti tampilan, dan sebagainya.

4.6 Aplikasi lainnya

Semua aplikasi komposit yang telah disampaikan mensyaratkan sifat fisis tertentu agar berfungsi dengan baik. Namun untuk digunakan dalam aplikasi lain, bisa saja bukan hanya kelayakan sifat fisis yang disyaratkan, melainkan juga sifat lain (biologi, kimia). Berikut ini dua contoh aplikasi yang memerlukan sifat tertentu selain sifat fisis, yaitu bioplastik yang dibuat dengan menggunakan karagenan dan montmorilonit dengan tambahan nanopartikel, dan briket yang dibuat dari limbah biomass.

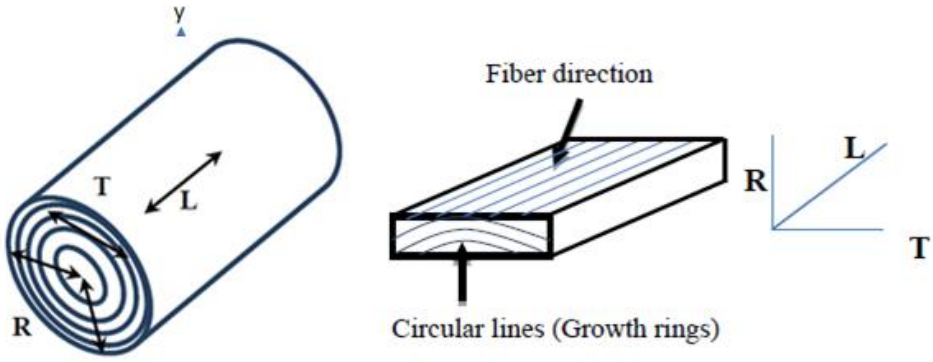
Salah satu penggunaan plastik secara masif dalam kehidupan sehari-hari adalah sebagai pengemas makanan. Sebagai akibatnya limbah plastik melimpah dan menjadi polutan bagi lingkungan. Studi pengembangan bioplastik yang ditujukan sebagai bahan pengemas makanan dilakukan dengan karagenan dan montmorilonit dengan tambahan nano partikel (Genecya, 2023). Selain harus memiliki sifat mekanis dan termal yang memadai, bioplastik juga harus mempunyai sifat antimikroba. Penambahan nanopartikel ditujukan untuk peningkatan sifat antimikroba.

Briket merupakan bahan bakar alternatif yang terbuat dari biomass yang merupakan limbah perkebunan. Briket adalah hasil densifikasi dari partikel arang yang dibuat melalui proses pengarangan bagian tumbuhan tertentu seperti batang, tempurung (kelapa), kulit (kacang tanah), dan sebagainya. Briket dapat dibuat dengan menggunakan arang dari dua jenis tumbuhan berbeda. Kualitas briket tidak hanya ditentukan oleh karakteristik fisis seperti sifat mekanis dan densitas, tetapi juga oleh kandungan energinya.

5 STUDI KOMPUTASI/SIMULASI KOMPOSIT

5.1 Prediksi Modulus Young pada Sistem Tunggal dan Kombinasi Dua Material Anisotropik

Pada umumnya batang tumbuhan kayu bersifat anisotropik, di mana nilai modulus Young dipengaruhi oleh arah tarikan. Pada batang pohon dan papan kayu terdapat tiga arah pembebanan dengan karakteristik berbeda, yaitu arah L (longitudinal), T (tangensial) dan R (radial), seperti pada Gambar 16.



Gambar 16 Gambaran skematik tiga arah pada batang dan papan kayu: L (Longitudinal), T (Tangensial) dan R (Radial) (Widayani *et al.*, 2019).

Kajian pengaruh sudut tarikan terhadap modulus Young sistem material tunggal dan kombinasi dari dua material anisotropik telah dilakukan dengan menggunakan data referensi untuk modulus Young Oak red and Pine red pada Tabel 7 (Widayani *et al*. 2019).

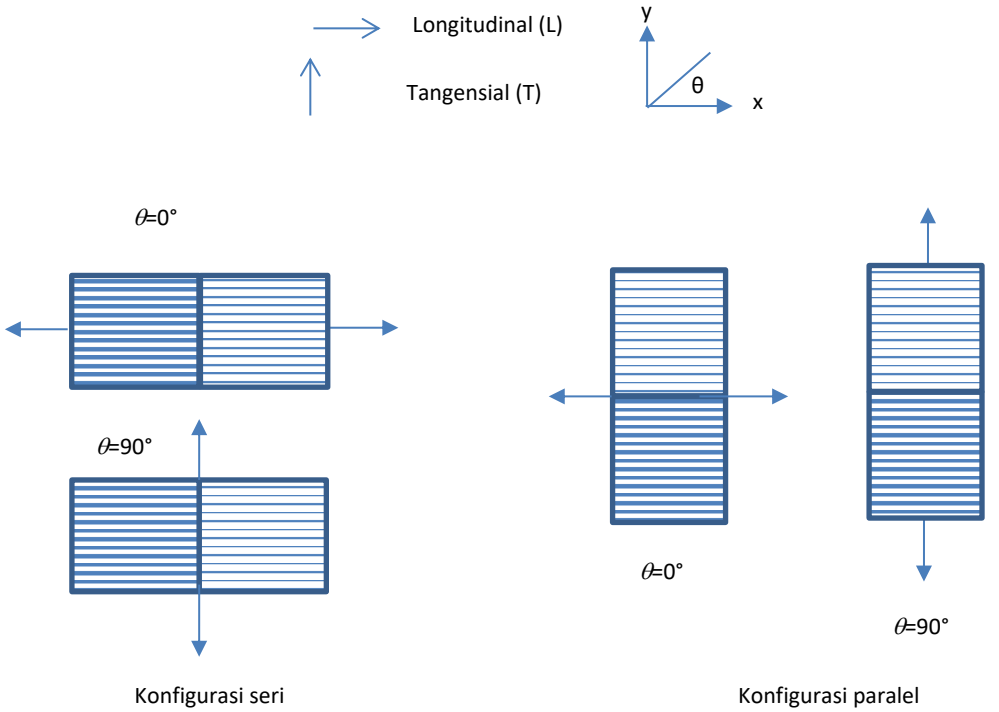
Tabel 7 Modulus Young Longitudinal (L) dan Tangensial (T).

Material	*Y_L (MPa)*	*Y_T/Y_L*	*Y_T (MPa)*
Oak red	12500	0,082	1025
Pine red	11200	0,044	492,8

Modulus Young material anisotropik pada sudut tarik θ memenuhi persamaan berikut:

$$Y_\theta = \frac{Y_x Y_y}{Y_y cos^2\theta + Y_x sin^2\theta} \quad (5)$$

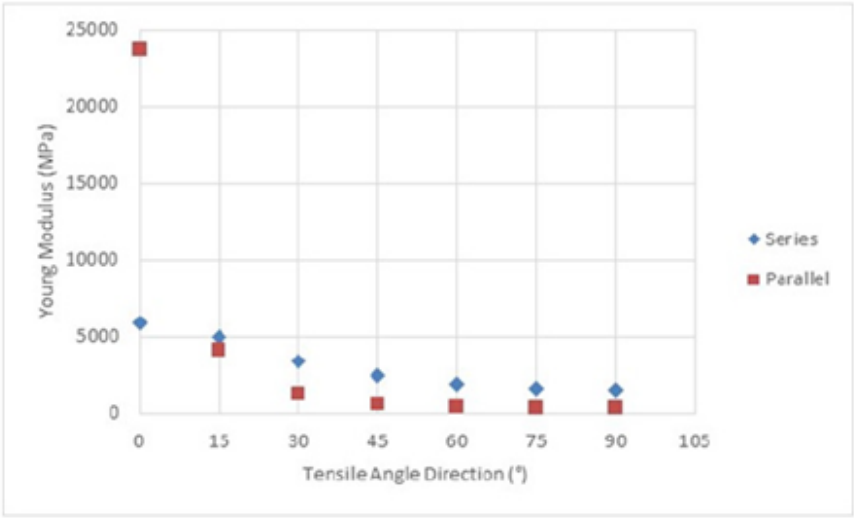
dengan Y_y dan Y_x adalah modulus Young pada arah sejajar dan tegaklurus arah serat. Sudut θ adalah sudut terhadap arah longitudinal.



Gambar 17 Konfigurasi seri dan paralel terhadap arah longitudinal (Widayani *et al.*, 2019).

Kajian dilakukan untuk mempelajari modulus Young pada susunan seri dan paralel dari dua komponen pada arah longitudinal (Gambar 17). Susunan seri pada sudut tarik 0° memiliki modulus Young Y_L, sedangkan susunan paralel pada sudut tarik 90° memiliki modulus Young Y_T.

Hasil simulasi ditampilkan sebagai plot modulus Young untuk konfigurasi seri dan paralel arah longitudinal (L) dari gabungan Oak red dan Pine red terhadap sudut tarikan (Gambar 18). Pada sudut tarik 0°, modulus Young konfigurasi seri jauh lebih rendah daripada paralel. Namun dengan meningkatnya sudut tarik, modulus Young konfigurasi paralel turun secara signifikan menjadi di bawah konfigurasi seri.



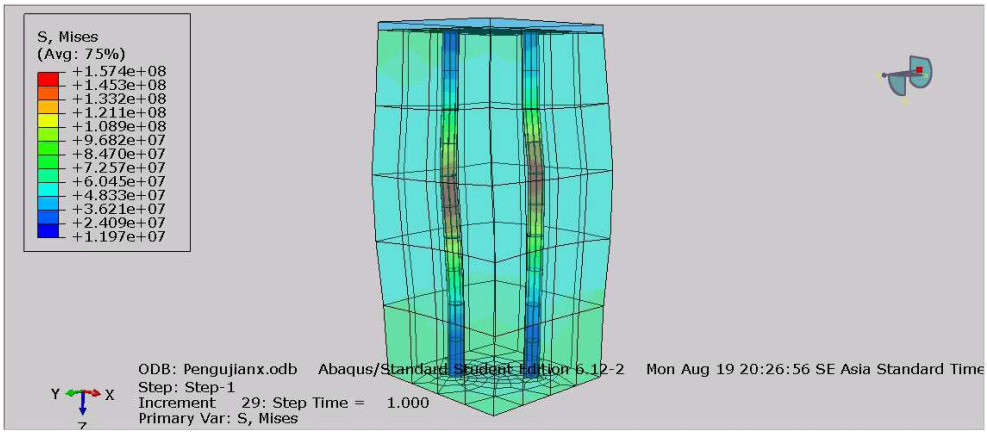
Gambar 18 Plot modulus Young dari susunan seri dan paralel konfigurasi Longitudinal (L) untuk gabungan Oak red dan Pine red (Widayani *et al.*, 2019).

5.2 Respons Internal Epoksi Menggunakan Model Komposit Serat Lurus

Studi mengenai respons model komposit terhadap beban kompresi telah dilakukan menggunakan model komposit dengan serat dari batang grafit dan matriks epoksi (Aditya, *et al.*, 2014). Sampel model komposit dibuat dengan variasi jumlah batang grafit. Data eksperimen menunjukkan bahwa batang grafit praktis tidak memengaruhi sifat tekan dari komposit sehingga respons komposit praktis merupakan respons dari epoksi. Penggunaan batang grafit memberi gambaran terhadap proses deformasi yang terjadi. Di bawah beban kompresi, model komposit membengkak di bagian sisi (Gambar 19). Hal ini menunjukkan bahwa respons internal epoksi terhadap beban luar bersifat isotropik dalam arah lateral.

Gambar 19 Foto sampel dengan variasi jumlah batang grafit setelah uji kompresi (Aditya *et al*, 2014).

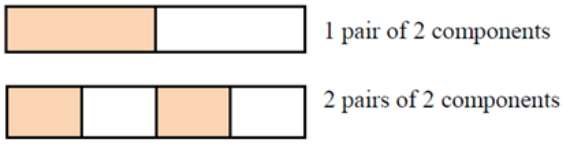
Hasil eksperimen tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi yang diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak Abaqus. Dengan menambahkan bahan tipis rapuh yang menempel pada bagian atas model, diperoleh hasil simulasi mendekati pola respons epoksi seperti pada eksperimen (Gambar 20).



Gambar 20 Verifikasi simulasi terhadap hasil eksperimen (Aditya *et al*., 2014).

5.3 Penyerapan Suara pada Model 1D Komposit

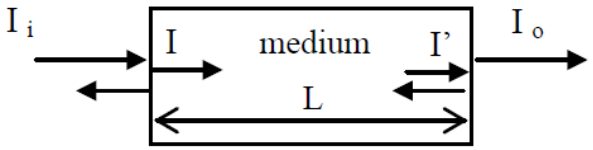
Studi komputasi mengenai absorpsi suara pada komposit telah dilakukan untuk model komposit 1D. Konfigurasi komponen untuk satu komposisi tertentu dapat berbeda, tergantung pada dimensi komponen yang digunakan. Sebagai contoh, pada Gambar 21 ditunjukkan dua konfigurasi berbeda untuk komposisi komponen 1 dan 2 yang sama (masing-masing 50%).



Gambar 21. Ilustrasi komposit dua komponen (50:50) dengan konfigurasi berbeda (Widayani *et al.*, 2016).

Pada studi tersebut dilakukan perhitungan intensitas bunyi yang diteruskan oleh model komposit. Gelombang yang datang pada perbatasan medium (komponen) mengalami refleksi dan transmisi. Akibatnya hanya sebagian intensitas gelombang datang yang diteruskan ke medium. Selama gelombang menjalar dalam medium terjadi atenuasi sehingga di ujung lain

medium, intensitas gelombang kembali berkurang. Di batas permukaan medium kembali terjadi pemantulan dan transmisi (Gambar 22).



Gambar 22 Intensitas gelombang datang I_i dan yang diteruskan oleh medium I_o (Widayani *et al*., 2016).

Dengan menggunakan rumus transmitansi (Persamaan 6) dan atenuasi Beer-Lambert (Persamaan 7), dapat diturunkan rumus intensitas yang diteruskan oleh model komposit (I_o) (Persamaan 8). Rumus I_o digunakan secara berulang, dengan jumlah pengulangan sesuai dengan konfigurasi model yang digunakan.

$$T_{12} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \tag{6}$$

$$I' = Ie^{-\sigma L} \tag{7}$$

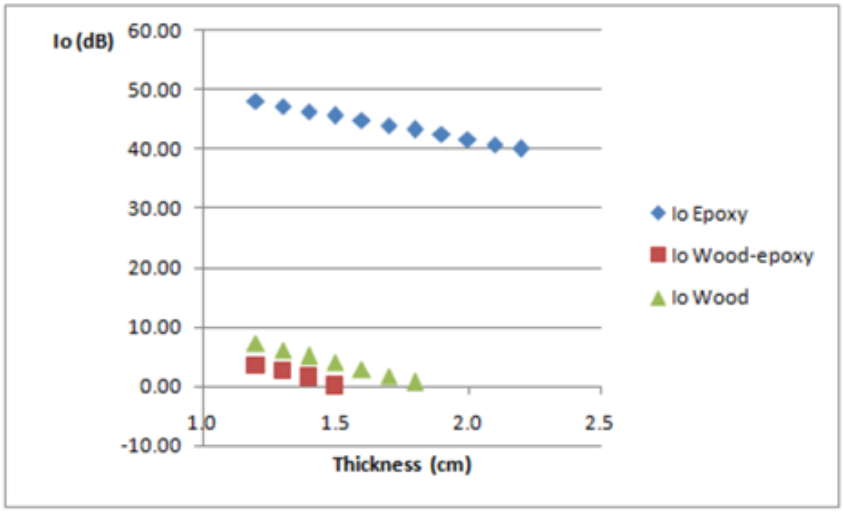
$$I_{n+1}{}^{t}(0) = T_{n,n+1}I_n{}^{i} \tag{8}$$

dengan Z: impedansi, σ: koefisien atenuasi, L: panjang lintasan medium (panjang komponen).

Pada studi ini digunakan model komposit kayu-epoksi. Gelombang bunyi datang dari medium udara ke model komposit lalu merambat dalam komposit. Intensitas bunyi yang diteruskan oleh komposit dihitung berdasarkan Persamaan 6-8. Nilai Z yang digunakan adalah Z_{udara} = 413 Rayl, Z_{epoksi} = 314 MRayl dan Z_{kayu} = 1.57 MRayl. Nilai koefisien atenuasi yang digunakan adalah σ_{epoksi} = 8 dB/cm dan σ_{kayu} = 22 dB/cm. Perhitungan intensitas yang diteruskan oleh model komposit menggunakan data intensitas gelombang datang 80 dB (bising lalulintas).

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa intensitas gelombang yang diteruskan komposit lebih rendah dari intensitas yang diteruskan oleh epoksi saja atau oleh kayu saja (Gambar 23). Hal ini dapat terjadi karena adanya

sejumlah perbatasan medium di dalam komposit yang mengakibatkan refleksi terjadi berulang di dalam komposit.

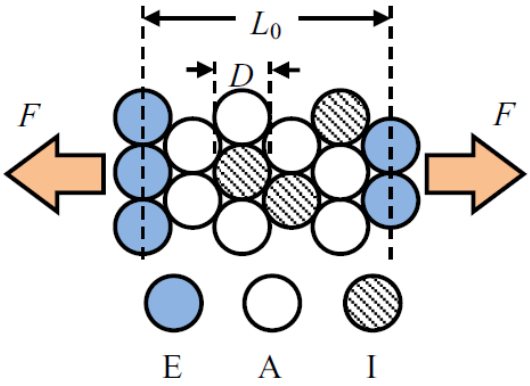


Gambar 23 Intensitas gelombang transmisi yang melewati komposit (50:50) lebih rendah dari yang melewati kayu saja atau epoksi saja (Widayani *et al.*, 2016).

Nilai I_o dipengaruhi oleh komposisi dan konfigurasi/ukuran komponen. I_o menurun secara linear dengan meningkatnya fraksi kayu. I_o juga menurun untuk konfigurasi yang menggunakan ukuran komponen yang lebih kecil.

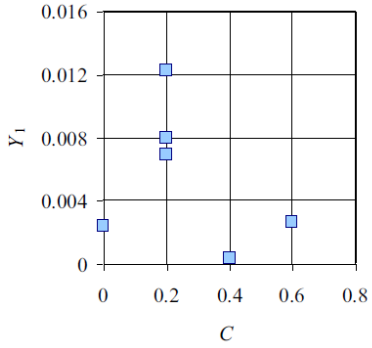
5.4 Perhitungan Parameter Y_1 yang Proporsional dengan Modulus Elastisitas pada Model Komposit Dua Dimensi untuk Dua Jenis Butiran

Viridi *et al.* (2012) melakukan studi komputasi perhitungan parameter Y_1 yang proporsional dengan modulus elastisitas pada model komposit dua dimensi untuk dua jenis butiran untuk beberapa konfigurasi dan konsentrasi (Viridi *et al.*, 2012). Perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan metode dinamika molekul yang mengimplementasikan Gear prediktor-korektor urutan kelima. Gaya antar butiran yang digunakan adalah gaya normal (saling menolak) dan gaya ikat selektif. Formulasi gaya ikat bergantung pada posisi setiap butiran dalam konfigurasi komposit: *ends grains* (E), *adhesive grains* (A), dan *interstitial grains* (I) (Gambar 24).



Gambar 24 Model komposit granular 2D dengan diameter sama. E, A dan I adalah butiran *ends*, *adhesive,* dan *interstitial*. L_0 adalah Panjang awal, F adalah gaya Tarik (Viridi *et al.*, 2012).

Pada kajian tersebut dipelajari pengaruh konsentrasi dan rasio k_1/k_2 yang merepresentasikan rasio kekuatan pengikat butiran A terhadap kekuatan dari butiran I terhadap nilai Y_1. Hasil studi menunjukkan variasi nilai Y_1 terhadap konsentrasi butiran I (C) seperti pada Gambar 25, di mana diperoleh nilai maksimum Y_1 pada nilai C=0,2. Di sisi lain, nilai rerata Y_1 meningkat dengan meningkatnya rasio k_1/k_2.



Gambar 25 Plot Y_1 terhadap konsentrasi butiran interstitial (Viridi *et al.*, 2012).

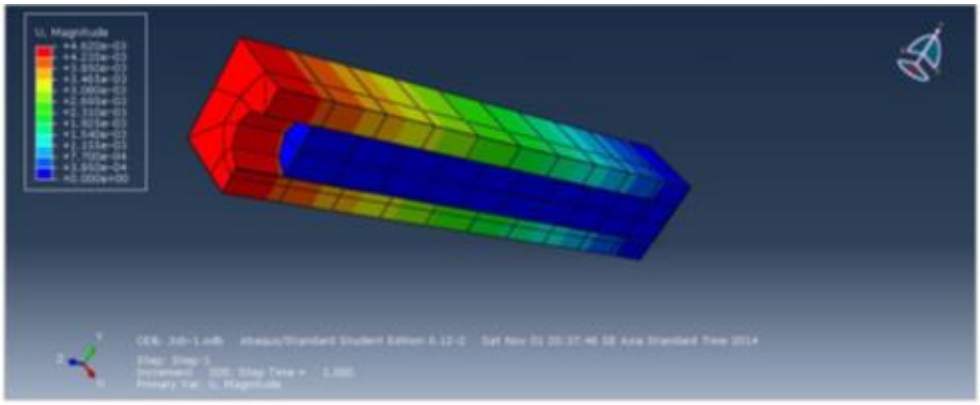
5.5 Simulasi Pengaruh Koefisien Gesekan pada Kekuatan Ikatan Antara Matriks dan *Filler* pada Komposit Serat Kontinu

Karakteristik fisis komposit berbasis serat alami dipengaruhi oleh kemampuan melekatnya serat dengan matriks polimer. Pada proses pembuatan, kadang diperlukan perlakuan khusus pada serat sebelum

dicampurkan dengan matriks demi mendapatkan kekuatan ikatan yang baik. Kekuatan ikatan antara matriks dan serat berkaitan dengan kondisi di area permukaan batas antara matriks dan serat, sehingga terkait dengan gesekan antara kedua permukaan tersebut.

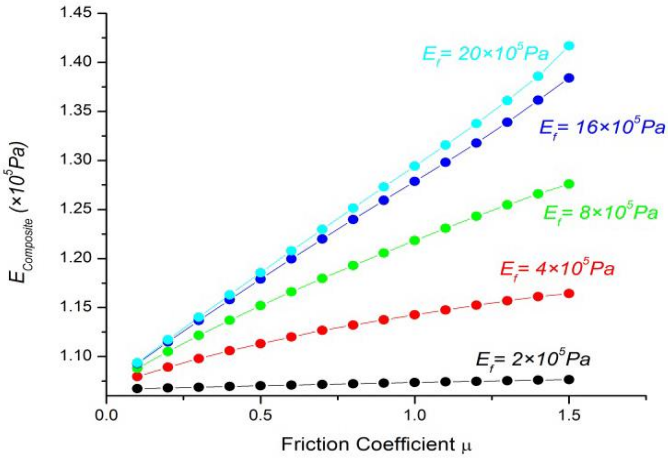
Studi mengenai pengaruh gesekan terhadap kekuatan ikatan antara matriks dan serat dilakukan dengan simulasi pada model komposit dengan *filler* berupa serat kontinu (Aditya *et al.*, 2014). Simulasi dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan aplikasi Abaqus.

Data modulus Young matriks yang digunakan adalah E_m=106010 Pa, sementara data modulus Young serat divariasikan dalam rentang (4-20) 10^5 Pa. Karena modulus Young matriks lebih kecil dari serat, maka secara keseluruhan elongasi matriks lebih besar dari elongasi serat. Tampilan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 26.



Gambar 26 Distribusi strain hasil simulasi Abaqus pada material serat lurus kontinu (Aditya *et al.*, 2014).

Modulus Young dihitung sebagai rasio antara *stress* terhadap *strain* total. Hasil simulasi memperlihatkan pengaruh koefisien gesekan dan modulus Young serat terhadap modulus Young komposit seperti pada pada Gambar 27. Modulus Young komposit meningkat dengan meningkatnya koefisien gesekan dan modulus Young serat.



Gambar 27 Plot hasil perhitungan modulus elastisitas terhadap koefisien friksi untuk beberapa nilai modulus elastisitas serat (Aditya *et al.*, 2014).

6 RISET LANJUTAN

6.1 Komposit Hijau (*Green composites*)

Perkembangan pesat dalam riset dan aplikasi komposit berbasis serat alami dipicu oleh kerusakan lingkungan akibat limbah material yang tidak dapat terurai dalam waktu singkat. Dalam perkembangannya, baik dari aspek jenis serat, teknik persiapan serat, jenis matiks polimer serta teknologi pabrikasinya, NFC berkualitas unggul telah berhasil diproduksi dan diaplikasikan dalam berbagai bidang. Kini produsen NFC bertumbuhan dan penggunaan NFC telah meluas di berbagai negara.

Kebanyakan polimer yang digunakan dalam pembuatan komposit saat ini berasal dari petrokimia, yang sumber utamanya adalah minyak bumi, yang pada ujung masa pemakaiannya akan menjadi limbah. Masalah lain yang terkait langsung dengan produksi dan setelah penggunaan bahan polimer di antaranya adalah menipisnya sumber daya minyak bumi, efek rumah kaca, perubahan iklim global, dan peningkatan emisi CO_2. Kondisi ini memicu upaya untuk mengembangkan sistem material berkelanjutan yang dapat digunakan kembali atau dibuang dengan mudah tanpa merusak alam. Untuk itu, upaya pengembangan material **komposit hijau (*green composites*)** menjadi penting.

Komposit hijau adalah komposit berbasis serat alami yang dikembangkan dengan menggunakan resin 'hijau' atau resin berbasis tanaman. Dengan demikian komposit hijau adalah material yang sepenuhnya dapat terdegradasi. Kebutuhan pengembangan komposit hijau didorong oleh keselamatan lingkungan di mana manusia menginginkan lingkungan khususnya tanah dan air, yang bersih dari limbah material. Selain itu juga ada faktor lain seperti cadangan minyak bumi yang terbatas sehingga perlu dicari material lain untuk menggantikan komposit konvensional yang berbasis minyak bumi. Komposit hijau merupakan material yang dapat terdegradasi tanpa meninggalkan limbah di tanah seperti yang diilustrasikan pada Gambar 28.

Gambar 28 Siklus keberadaan komposit hijau yang tidak menyisakan limbah bagi lingkungan.

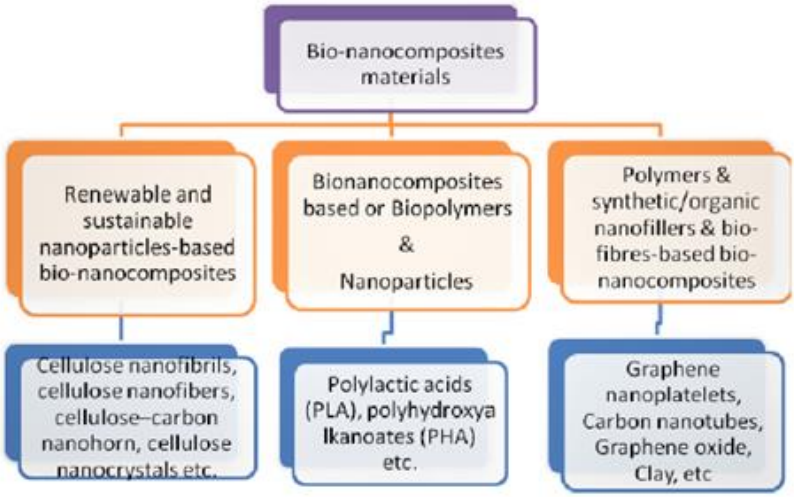
Resin hijau dan serat alami berasal dari tanaman yang merupakan sumber daya terbarukan. Hingga saat ini, penelitian ekstensif telah dilakukan pada banyak resin hijau seperti resin protein kedelai, resin protein gluten gandum, kardanolresin, resin minyak biji rami, karet alam terepoksidasi, dan sebagainya. Resin hijau yang paling banyak digunakan hingga saat ini adalah PLA. Komposit hijau berbasis PLA memiliki beberapa keunggulan, di antaranya adalah tingkat degradabilitas yang tinggi, sifat mekanik yang baik, kemudahan pabrikasi, emisi rendah, energi proses rendah, serta tingkat transparansi dan daur ulang yang tinggi (Kopparthy & Netravali, 2021). Penggunaan resin hijau lainnya masih dalam kajian, belum masuk ke area komersial.

Berdasarkan sifat mekanisnya, potensi penggunaan komposit hijau di antaranya adalah sebagai material struktur, utamanya material struktur sekunder. Contoh material struktur sekunder adalah kusen jendela/pintu atau partisi/dinding geser di bangunan, panel atap di otomotif. Komposit hijau juga berpotensi digunakan sebagai material struktur primer/utama. Contoh material struktur utama adalah penguat bumper depan dan belakang otomotif (Kopparthy & Netravali, 2021).

6.2 Bio-nanokomposit (*Bio-nanocomposites*)

Perkembangan riset dalam bidang material mengalami lompatan dengan adanya karakteristik unggul material yang terstruktur dalam ukuran nanometer. Keunggulan karakteristik nanomaterial memicu perkembangan nanokomposit, yaitu komposit yang mengandung unsur nanomaterial. Nanomaterial dijumpai sebagai material dengan struktur nano 1D, 2D, atau 3D. Belakangan ini riset dalam bidang nanomaterial telah menjadi fokus dari banyak peneliti di berbagai belahan dunia. Sejalan dengan hal itu, salah satu topik penelitian NFC pada saat ini yang menarik adalah nanokomposit berbasis serat alami yang disebut sebagai bio-nanokomposit.

Karki *et al.* (2021) mengklasifiksikan bio-nanokomposit seperti pada Gambar 29.

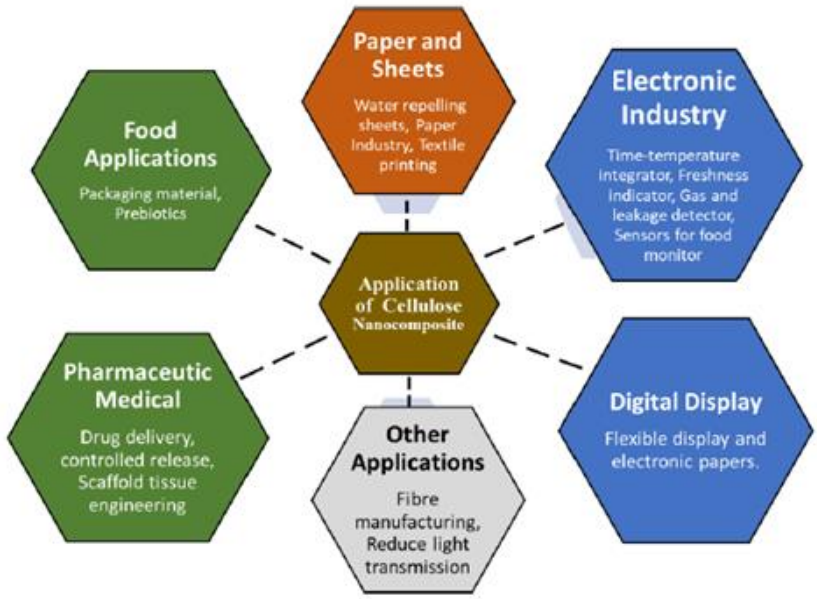


Gambar 29 Klasifikasi bio-nanocomposite berbasis selulosa (Karki *et al.*, 2021).

Penelitian NFC yang melibatkan material berukuran nano dapat meningkatkan karakteristik NFC yang tentunya akan meningkatkan fungsi komposit yang dihasilkan. Secara umum material dengan ukuran nano dapat berasal dari serat alaminya sendiri (misalnya nanoselulosa), atau partikel nano yang ditambahkan pada NFC. Selulosa berukuran nano, yang disebut selulosa *nanocrystals* atau *micro fibrillated cellulose* (MFC), terbentuk pada ekstrak dari serat alami. Penggunaan nano selulosa dan serat mikro dalam bio-nanokomposit adalah sebagai penguat. Nanokomposit yang dikembangkan menggunakan selulosa bukan hanya memiliki keunggulan

dalam hal sifat mekanis (kekakuan dan kekuatan mekanis yang tinggi), namun juga bersifat *biodegradable*.

Potensi aplikasi bio-nanokomposit mencakup berbagai bidang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30.



Gambar 30 Aplikasi bio-nanokomposit berbasis selulosa pada berbagai area (Karki *et al*., 2021).

Metode pembuatan bio-nanokomposit yang terbuat dari biopolimer dan nano partikel adalah interkalasi solusi, polimerisasi interkalatif *in situ*, interkalasi lelehan, dan sintesis templat (Pande & Sanklecha, 2017). Pada metode interkalasi solusi, larutan partikel nano yang membengkak (misalnya trombosit silikat dalam air) dicampur dengan larutan biopolimer (misalnya pati). Pada proses tersebut dihasilkan struktur biokomposit silikat berlapis akibat dari rantai biopolimer yang menggantikan pelarut dalam ruang antar-lapisan silikat. Pada metode polimerisasi interkalatif in situ, nanopartikel didispersikan dalam monomer cair atau larutan monomer, sehingga dapat terjadi pembentukan polimer di antara lembaran interkalasi. Dalam proses interkalasi lelehan, polimer dipanaskan hingga meleleh kemudian dicampur dengan nanopartikel. Sedangkan pada metode sintesis templat, biomolekul berfungsi sebagai cetakan (templat) untuk anorganik yang dihasilkan dari prekursor. Templat bio organik berbentuk partikel berukuran nano yang terperangkap dalam matriks mesopori.

7 RANGKUMAN

Tersedianya berbagai serat alami dengan beragam sifat fisis yang dimilikinya menjadikan serat alami sebagai komponen NFC dengan potensi penggunaan dalam berbagai aplikasi. Pengembangan NFC mempunyai dua keunggulan utama, yaitu pemanfaatan serat alami yang sering kali tersedia sebagai limbah, dan sebagai upaya untuk mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah material yang *non-biodegradable*. Dengan meningkatnya penggunaan NFC pada berbagai aplikasi, pengembangan NFC juga meningkatkan nilai ekonomi serat alami.

Karakteristik NFC bukan hanya dipengaruhi oleh sifat komponennya (serat alami dan matriks), tetapi juga oleh proses pembuatannya. Sifat fisis serat alami tidak hanya dipengaruhi oleh jenisnya, tetapi juga oleh lokasi tumbuh, proses penumbuhan dan umur tumbuh. Sebelum proses pembuatan NFC, serat alami perlu disiapkan dengan perlakuan khusus agar dicapai karakteristik NFC yang optimal.

Proses utama dalam pembuatan NFC adalah pencampuran antara serat dan matriks. Pemberian tekanan dan temperatur tinggi seringkali diperlukan untuk mendapatkan komposit yang kompak dengan densitas tinggi. Prosedur pembuatan NFC bergantung pada ukuran dan susunan komposit yang diinginkan. Meskipun proses pembuatan komposit nampak sederhana, namun untuk skala besar/komersial, diperlukan peralatan/teknologi yang memadai untuk mendapatkan hasil terbaik. Hal ini penting agar produk NFC yang dihasilkan dapat bersaing khususnya dari segi kualitas, dengan material komersial yang ada.

Matriks yang digunakan dalam pembuatan NFC adalah polimer. Pemilihan jenis polimer disesuaikan dengan karakteristik NFC yang diinginkan. Dalam rangka pengembangan material yang ramah lingkungan, pemilihan polimer alami yang bersifat *biodegradable* memungkinkan terbentuknya NFC yang *biodegradable*, yang baik untuk lingkungan dan aman bagi kesehatan. Studi untuk mengembangkan NFC yang *biodegradable* sempurna adalah merupakan tantangan dalam bidang NFC.

Topik penelitian lanjutan dalam bidang NFC adalah komposit hijau dan bio-nanokomposit. Komposit hijau adalah komposit yang dikembangkan

dengan menggunakan serat alami dan matriks polimer yang berasal dari tumbuhan. Pengembangan komposit hijau merupakan jawaban atas tantangan kebutuhan material yang tidak menyisakan limbah bagi lingkungan.

Bio-nanokomposit adalah komposit berbasis serat alami yang mengandung komponen nano material. Komponen nano material dapat berupa nanoselulosa atau material nano inorganik. Nanoselulosa berpotensi sebagai komponen penguat dalam bio-nanokomposit. Bio-nanokomposit dapat dibuat dengan menggabungkan biopolimer dengan material nano. Potensi aplikasi komposit hijau dan bio-nanokomposit meliputi banyak bidang, sehingga riset dalam kedua kelompok komposit tersebut diminati banyak peneliti.

8 UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucap puji dan syukur kepada Allah Swt., atas karunia-Nya kita diberi kesehatan, kebahagiaan, dan kesempatan menjalani kebersamaan dalam berteman, berkarya, dan berjuang. Penulis meyakini bahwa suatu keberhasilan tidaklah dapat dicapai oleh seseorang tanpa doa, dukungan, dan bantuan dari orang-orang sekitar. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak, yang telah memberikan doa, dukungan, dan bantuan, khususnya kepada:

1. Prof. Zaki Suud, Prof. Abdul Waris, Dr. Siti Nurul Khotimah selaku Ketua KK Fisika Nuklir dan Biofisika yang selalu mendukung penelitian penulis.
2. Prof. Dr. Edy Tri Baskoro selaku Ketua FGB ITB atas semua dukungan dan dorongan yang diberikan bagi kemajuan penulis.
3. Prof. Dr. Wahyu Srigutomo selaku Dekan FMIPA ITB atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan bagi penulis.
4. Dr. Hanni Garminia Y., S.Si., M.Si. sebagai Wakil Dekan Sumberdaya FMIPA ITB atas atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan bagi penulis.
5. Prof. Dr. Tjia May On alm, sebagai pembimbing S1 dan S2 di Fisika ITB yang telah mengenalkan penulis pada dunia riset khususnya dalam topik *functional polymer*.
6. Prof. John L. Stanford dan Prof. Peter A. Lovell sebagai supervisor program doktor di Manchester Material Science Centre, UMIST yang telah mengenalkan penulis pada atmosfir riset yang baik serta topik riset polimer dua fasa *Diacetylene containing polyutrethane*.
7. Rekan sejawat yang memberikan dorongan kepada penulis sehingga tetap semangat berkarya dan telah menjadi teman peneliti yang sangat baik bagi penulis khususnya Prof. Dr Khairurrijal, Dr. Sparisoma Viridi, Dr. Siti Nurul Khotimah, Dr. Irfan Dwi Aditya, dan Dr. Triati Dewi Kencana Wungu, dan Dr. Damar Rastri Adhika.
8. Rekan sejawat dosen-dosen Fisika ITB atas kebersamaan, kekeluargaan dan dukungannya selama ini.
9. Para mahasiswa bimbingan yang telah dengan tekun terlibat dan mewarnai kegiatan penelitian penulis.
10. Seluruh staf tendik di lingkungan Fisika dan FMIPA ITB yang senantiasa bersedia membantu khususnya dalam masalah administrasi dan teknis.

11. Suami tercinta Ir. Mei Sutrisno, M. Sc. Ph. D. dan anak-anak tersayang: Dr. Damar Rastri Adhika dan Sandi Bagus Permadi, S.T. yang selalu ada dan menjadi sumber motivasi bagi penulis untuk selalu berusaha menjadi lebih baik.
12. Orang tua terkasih, Alm. Bapak Haryono dan Ibu Subandiah yang dengan kasih sayangnya telah dengan sabar mengasuh dan membimbing penulis sejak masa kanak-kanak.
13. Keluarga besar Bapak Haryono atas kebersamaan dalam menghadapi suka dan duka kehidupan selama ini.
14. Semua pihak lainnya yang tak dapat tersebut satu per satu.

Semoga Allah Swt. membalas kebaikan bapak/ibu dan sdr/sdri semua dengan berlipat ganda.

DAFTAR PUSTAKA

Adhika D.R., Prasetyo I., Noeriman A., Hidayah N., & Widayani. (2020). Sound Absorption Characteristics of Pineapple Leaf/Epoxy Composite, *Archieves of Acoustics, 45*(2), 233–240, doi: 10.24425/aoa. 133144.

Aditya, I.D., Widayani, Viridi, S. & Khotimah, S.N. (2015). Simulation of Bond Strength Between Matrix and Filler of Aligned Continuous Fiber Composite in term of Friction Coefficient, *AIP Conference Proceeding, 1677*, 070005. doi: 10.1063/1.4930709.

Aditya, I.D., Widayani, Viridi, S., & Khotimah, S.N. (2014). Study of Internal Response of Epoxy Due to Compressive Load Via Experiment and Simulation Using Abaqus FEA Sofware, *Advanced Materials Research, 896*(549-552). doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.896.549.

Baladivakar, S., Starvin M.S., & Raj, J.B. (2023). Performance Evaluation of Natural Composites Made from Banyan and Cotton Fibers for Sustainable Thermal Insulation Applications, *Journal of Natural Fibers, 20*(1), https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15440478.2022.2123881.

Czapla, A., Ganesapillai, M., & Drewnowski, J. (2021). Review Composite as a Material of the Future in the Era of Green Deal Implementation Strategies, *Processes, 9*, 2238. https://doi.org/10.3390/pr9122238 .

Domke, P.V. (Prof.), Mude, V.D. (Prof.) (2015). Natural Fiber Reinforced Building Materials, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 12*(3), Ver. II, 104-107.

Farizi, T.A., & Widayani. (2014). Kajian Sifat Fisis dan Mekanis Papan Partikel Sekam Padi Berdasarkan Standar SNI 03-2105-2006, *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika 2014 (SKF 2014),* 17-18 November 2014, Bandung, Indonesia.

Genecya, G. (2023). Sintesis dan Karakterisasi Bioplastik Berbasis Karagenan dengan Penambahan Nanopartikel Perak dan Serum Oksida sebagai Kemasan Pangan, *Tesis*, Program Studi Magister Teknologi Nano ITB.

Gholampour, A., & Ozbakkaloglu T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications, *J Mater Sci 55*(829–892).

Gowda, T.G.Y., Sanjay, M.R., Bhat, K.S., Madhu, P., Senthamaraikannan, P., & Yogesha, B. (2018). Polymer matrix-natural fiber composites: An overview, *Cogent Engineering, 5*(1), 1446667, doi: 10.1080/23311916.2018.1446667.

Hassan, T., Jamshaid, H., Mishra, R., Khan, M.Q., Petru, M., Novak, J., Choteborsky, R. & Hromasova, M. (2020). Acoustic, Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural Fibers Waste, *Polymers, 12(*654), 1-19. doi:10.3390/polym12030654.

https://textilelearner.net/mineral-fiber-properties-types-and-uses, diakses 19 Juni 2023.

Hoque, M.E., Rayhan, A.M., & Shaily, I. (2021). Natural Fiber-based Green Composites: Processing, properties and biomedical Applications, *Applied Sciences and Engineering Progress, 14*(4), 689-718, doi: 10.14416/j.asep.2021.09.005.

Hull, D. & Clyne, T.W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, second edition.

Karki, S., Gohain, M.B., Yadav, D., Ingole, P.G., (2021). Nanocomposite and bio-nanocomposite polymeric materials/membranes development in energy and medical sector: A review, *International Journal of Biological Macromolecules 193*(2021), 2121–2139.

Kopparthy, S.D.S., & Netravali, A.N. (2021). Review: Green composites for structural applications, *Composites Part C: Open Access 6* (2021) 100169

Naik, V., Kumar, M. & Kaup, V. (2022). A Review on Natural Fiber Composite Materials in Automotive Applications, Eng. Sci., 18, 1–10.

Namvar, F., Jawaid, M., Md Tahir, P., Mohamad, R., Azizi, S., Khodavandi, A., Rahman, H. S., & Nayeri, M. D. (2014). Potential use of plant fibres and their composites for biomedical applications, *BioRes*. 9(3), 5688-5706.

Pande, V.V. & Sanklecha, V.M. (2017). Bionanocomposite: A Review, *Austin J Nanomed Nanotechnol, 5*(1): 1045.

Panjaitan, J. (2013). Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Papan Partikel dari Limbah Kulit Kakao, *Tesis,* Program Studi Magister Pengajaran Fisika, FMIPA, ITB.

Peças, P., Carvalho, H., Salman, H. & Leite, M. (2018). Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review, *J. Compos. Sci, 2*(66), 1-20. doi:10.3390/ jcs2040066.

Rahayu, M. (2014). Pembuatan dan Karakterisasi Papan Komposit Limbah Ampas Sagu, *Tesis*, Program Studi Magister Pengajaran Fisika, FMIPA, ITB.

Ren, H., Sun, J., Zhao, Q., Zhou, Q., Ling, Q., (2008) Synthesis and characterization of a novel heat resistant epoxy resin based on N, N0-bis(5-hydroxy-1-naphthyl) pyromelliticdiimide, *Polymer, 49*(24), 5249–5253, https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.09.047.

Schaffer, J.P., Saxena, A., Antolovich, S.D., Sanders Jr, T.H., Steven B., S.B. (1999). *The Science and Design of Engineering Materials*, Mc Graw-Hill, second edition.

Sutrisno, W., Rahayu, M., & Adhika, D.R. (2020). Thermal Properties of Sago Fiber-Epoxy Composite, *Fibers. 8*(4), doi: 10.3390/fib8010004.

Taangga, B. (2013). Pembuatan Komposit papan Serat dari tandan Kosong Kelapa Sawit dan Karakterisasi Sifat Fisis dan Mekanisnya, *Tesis*, Program Studi Magister Pengajaran Fisika, FMIPA, ITB.

Takagi, H., Nakagaito A. N., & Liu, K. (2014). Heat transfer analyses of natural fibre composites, *WIT Transactions on The Built Environment, 137*, © WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3509 (on-line) doi:10.2495/HPSM140211.

Viridi, S., Widayani, & Khotimah, S.N. (2012). 2-D granular model of composite elasticity using molecular dynamics Simulation, *AIP Conf. Proc. 1454*, 219. doi: 10.1063/1.4730725.

Widayani, Noeriman, A., Wungu, T.D.K., & Adhika, D.R. (2022). Sound Absorption Characterisation of layered Arrangements of Pineapple Leaf Fiber-Epoxy Composite prepared by a Simple Mixing Hot Pressing Process, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2243 012047.

Widayani, Viridi, S., Khotimah, S.N., & Damar R. Adhika. (2016). Calculation of Acoustic Transmission Intensity of 1-D Composite Models for Sound Absorber Wall Application: Case Study on Wood – Epoxy Composite, *Int. J. Comp. Mater.*, 6(4),140-143. 10.5923/j.cmaterials.20160604.07

Widayani, Wungu, T.D.K., & Viridi, S. (2019). The Influence of Tensile Angle Direction on the Young Modulus of Single and Combination of Two Anisotropic Materials, *Int. J. Comp. Mater. 9*(2), 33-38. doi: 10.5923/j.cmaterials.20190902.01.

CURRICULUM VITAE

Nama	: Widayani
Tempat/tgl lahir	: Bandung/23 Desember 1960
Kel. Keahlian	: Fisika Nuklir dan Biofisika
Alamat Kantor	: Gedung Fisika, Jalan Ganesa 10 Bandung
Nama Suami	: Mei Sutrisno
Nama Anak	: 1. Damar Rastri Adhika 2. Sandi Bagus Permadi

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Sarjana Fisika (Dra.), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1984
- Magister Sains (M.S.), bidang Fisika, Institut Teknologi Bandung (ITB), 1991
- Doctor of Philosophy (Ph.D.), bidang Polymer Science and Technology, University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), UK, 2003

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- Staf Pengajar Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 1990-sekarang
- Ketua Program Studi Magister Pengajaran Fisika, 23/7/0831/12/09 (sem 1 08/09)
- Ketua Program Studi Fisika (S2, S3), 1/1/10 - 31/12/11 (sem 2 09/10 - sem 1 10/11)
- Pjs Wakil Dekan Bidang Sumber Daya dan Perencanaan SPS, 1/1/12 - 31/3/12 (Sem 2 10/11)
- Ketua Program Studi Sarjana Fisika (S1), 2014 - 2015 (sem 2-13/14 - sem 1-14/15)
- Ketua Program Studi Sarjana Fisika (S1), 2016-2017 (sem 2 15/16 - sem 17/18)
- Tim Auditor Non Keuangan SPI ITB, 2018-sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, 1 Januari 1990
- Penata Muda, III/A, 1 April 1991
- Penata Muda Tk. 1, III/B, 1 Oktober 1995
- Penata, III/C, 1 Oktober 1998
- Penata Tk. I, III/D, 1 Oktober 2009
- Pembina, IV/A, 1 Oktober 2011

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1-4-1992
- Asisten Ahli, 1-5-1995
- Lektor Muda, 1-7-1998
- Lektor, 1-1- 2001
- Lektor Kepala, 1-4-2009
- Profesor/Guru Besar, 1 November 2022

V. KEGIATAN PENELITIAN

1. Peneliti Utama, *Studi Awal Pembuatan Bahan Komposit Polimer Serat Alami*, ITB 2011
2. Anggota Peneliti, *Optimasi Penumbuhan Polimer Material Biosensor Molecularly Imprinted Polymer (MIP) Atrazin*, Dikti 2012-2013
3. Peneliti Utama, *Sifat dan Kerusakan Mekanik Komposit dengan Filler Lurus Kontinu*, ITB 2013
4. Peneliti Utama, *Studi Komputasi Struktur Pada Molekular Imprinted Polimer (MIP) Berbasis Methacrylic Acid Sebagai Bahan Dasar Sensor*, Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi ITB 2016
5. Anggota Peneliti, *Development of Pineapple Leaf Based Sound Absorber*, P3MI KK Teknik Fisika 2018
6. Anggota Peneliti, *Sintesis dan Integhrasi Nano-Encapsulated Phase Change Material (PCM) pada Kain untuk Pembuatan Smart Textile*, PDUPT (Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi) 2018-2020
7. Peneliti Utama, *Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Berbasis Serat Nanas sebagai Pengganti Papan*, P3MI KK Nuklir dan Biofisika ITB 2019
8. Anggota Peneliti, *Studi Nanocomposite berbasis Montmorillonite dan Carrageenan untuk Penyerapan Limbah Tekstil*, P3MI KK Nuklir dan Biofisika ITB 2020

9. Anggota Peneliti, *Pengembangan dan Studi Nanokomposit berbasis Montmorillonite untuk Penyerapan Limbah Tekstil*, 2021
10. Peneliti Utama, *Studi awal pembuatan briket menggunakan limbah plastik dan limbah kelapa sawit*, P2MI KK Nuklir dan Biofisika ITB, 2022
11. Anggota Peneliti, *Pengaruh Penambahan AgNP dan CeNP terhadap Aktivitas Anti-mikroba dan Kualitas Bioplastik berbasis Karagenan sebagai Kemasan Pangan*, Penelitian Desentralisasi, Kemendikbudristek 2022
12. Peneliti Utama, *Pembuatan Briket Menggunakan Limbah Cangkang Kemiri dan Kulit Kacang Tanah*, P2MI FMIPA 2023

VI. PUBLIKASI

1. **Widayani** &. Tjia, M.O. (1991). Polimerisasi Polypyrrole Dengan Metode Elektrokimia Galvanostatik, *Laporan Penelitian ITB*, 1990/1991.
2. **Widayani**, Tjia, M.O., & Hidayat, R. (1992). Studi Pembuatan Elektroda Aktif Dengan Film Polimer Konduktif, *Laporan Penelitian ITB*, 1992/1993.
3. **Widayani**. (1994). Desain dan Konstruksi Baterei Sekunder Dengan Elektroda Polianilin.
4. **Widayani**, Simangunsong, J. (1997). Pengaruh Jenis Logam Elektroda Pada Baterei Sekunder Polianilin (PANI) Terhadap Unjuk Kerja Baterei, *Laporan Penelitian ITB*, 1996/1997.
5. Sutrisno, W., Stanford, J.L., & Lovell, P.A., (2005). Study on Application of Diacetylene-containing Copolyurethanes (DA-coPUs) coating as strain sensors using Raman Spectroscopy, *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, ISSN: 1858-036X, V1,1.
6. Sutrisno, W., Satira, S., & Arifin, P. (2006). Open-Ended-Experiment: a Research Based Learning (RBL) in Fundamental Physics Laboratory, *SEAAIR*, Langkawi, Malaysia.
7. Sutrisno, W., Waris, A., Haryono, S., Haryanto, F., Iskandar, A.A., Bijaksana, S., Sutarno, D., & Arifin, P. (2008). Model Pembelajaran Research Based Learning (RBL): Pengalamian di Program Studi Fisika Institut Teknologi Bandung, *Seminar Nasional Fisika Tahun 2008*, HFI, Bandung.
8. **Widayani**. (2009). Penumbuhan Sikap-sikap Positif melalui Pembelajaran Fisika. *Jurnal Pengajaran Fisika Sekolah Menengah, 1*(1), 14-17.
9. **Widayani**, Khairrurijal, Khotimah, S.N., & Viridi, S. (2009). Pemahaman Konsep Gelombang Elektromagnetik dengan Analogi terhadap Konsep Gelombang Mekanik, *Jurnal Pengajaran Fisika Sekolah Menengah* (ISSN 1979-4959), *1*(4).

10. Khairurrijal, Abdullah, M., Surtiyeni, N., **Widayani**, & Sustini, E. (2009). Konsep Komponen Listrik (Kapasitor, Induktor, dan Memristor) Menggunakan Analogi Konsep Resistor untuk Pengajaran di Sekolah Menengah Atas, *Jurnal Pengajaran Fisika Sekolah Menengah* (ISSN 1979-4959), *1*(4).
11. Widiatmoko, E., **Widayani**, Budiman, M., Abdullah, M. & Khairurrijal. (2011). A Simple spectrophotometer using common materials and a digital camera, *Physics Education, 46*(3), IOP Publishing Ltd (www.iop.org/journals/physed)
12. Khotimah, S.N., Viridi, S., **Widayani**, & Khairurrijal. (2011). The Dependence of Spring Constant in the Linear Range on Spring Parameters, *Phys. Educ., 47*(5), 540-543.
13. Khotimah, S. N., Viridi, S., **Widayani** & Waris, A. (2011). One-Dimensional Diatomic Elastic Granular Gas Vibration Temperature: Statistical theory and Molecular Dynamics Simulation, *Indonesian J. Phys., 22*(3).
14. Susanah, Y. & **Widayani**. (2011). Pembuatan dan Karakterisasi Komposit Menggunakan Arang dan Serat Bambu Apus dengan Matriks Epoxy Resin, *Prosiding Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sains 2011 (SNIPS 2011)*, 22-23 Juni 2011, Bandung, Indonesia.
15. Utami, L.S., & **Widayani**. (2011). Pemanfaatan Sampah Daun Manggis Menjadi Briket Bioarang Sebagai Bahan Bakar Alternatif, *Prosiding Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sains 2011 (SNIPS 2011),* 22-23 Juni 2011, Bandung, Indonesia.
16. **Widayani**, Susanah, Y., Utami, L.S., Khotimah, S.N., Viridi, S. (2011). Compressive Elastic Modulus of Natural Fiber Based Binary Composites, *International Conference on Physics and Its Application (ICPAP-2011)*, Bandung, 10-11 November 2011, *AIP Conf Proc.* (2012).
17. Viridi, S., **Widayani**, & Khotimah, S.N. (2011). 2-D GranularModel of Composite Elasticity using Molecular Dynamics Simulation, *International Conference on Physics and Its Application (ICPAP-2011)* Bandung, 10-11 November 2011, AIP Conf. Proc. (2012).
18. Arkundato, A., Su'ud, Z., Abdullah, M. & **Widayani**. (2012). Computational Study: Reduction of Iron Corrosion in Lead Coolant of fast Nuclear Reactor, *ICPAP 2011, Bandung, 10-11 November 2011, AIP Conf. Proc.*
19. Arkundato, A., Suud, Z., Abdullah, M., & Sutrisno, W. (2012). Molecular dynamic simulation on iron corrosion-reduction in high temperature molten lead-bismuth eutectic, *Turkish Journal of Physics.*

20. Royani, I., **Widayani**, Abdullah, M., & Khairurrijal. (2012). Pembuatan Polimer MIP (Molecularly Imprinted Polymer) Atrazin untuk digunakan sebagai material sensor, *Prosiding Seminar Nasional Material 2012*, Fisika Institut Teknologi Bandung, Bandung.
21. Royani, I., **Widayani**, Abdullah, M., & Khairurrijal. (2012). Pengaruh Konsentrasi Polimer (Molecularly Imprinted Polymer) Atrazin Terhadap Jumlah Ikatan yang terbentuk, *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sriwijaya, Palembang.
22. Royani, I., **Widayani**, Abdullah, M., & Khairurrijal. (2014). Characterization of an Atrazine Molecularly Imprinted Polymer Prepared by a Cooling Method, *AIP Conf. Proc. 1589*, 116 .
23. Royani, I., **Widayani**, Abdullah, M., & Khairurrijal. (2014). An Atrazine Molecularly Imprinted Polymer Synthesized Using a Cooling-Heating Method with Repeated Washing: Its Physico-chemical Characteristics and Enhanced Cavities, *Int. J. Electrochem. Sci., 9*, 5651 – 5662.
24. Khotimah, S.N., Haris, L., Viridi, S., **Widayani**, & Khairurrijal. (2015). Simple Harmonic Motion Experiment Using Force Sensor: Low Cost and Single Set Up, *The Online Journal of Science and Technology, 5*(1), 55-62.
25. **Widayani**, Viridi, S., & Khotimah, S.N. (2015). Theoretical Study on Mechanical Properties of 2-D Composite Models Containing Circular Fillers under Compression Load, *International Journal of Composite Materials*, 5(2).
26. Fatimah &**Widayani**. (2015). Pemanfaatan Limbah Kulit Pinang (Areca catechu L.) sebagai Filler Papan Komposit Penyerap Bunyi, *Seminar Kontribusi Fisika (SKF) 2015*, 16-17 Desember 2015, Bandung, 475-482.
27. Rahayu, M., & **Widayani**. (2015). Studi Awal Pembuatan Komposit Papan Serat Berbahan Dasar Ampas Sagu, *Seminar Kontribusi Fisika (SKF) 2015,* 16-17 Desember 2015, Bandung, 257-261.
28. Viridi, S., Khotimah, S.N., Novitrian, & **Widayani**. (2015). Fluctuation Theorem Application on 2-D Granular Materials Configurations, *Advanced Materials Research, 1123*, 12-15.
29. **Widayani**, Viridi, S., Khotimah, S.N., & Adhika, D.R. (2016). Calculation of Acoustic Transmission Intensity of 1-D Composite Models for Sound Absorber Wall Application: Case Study on Wood – Epoxy Composite, *International Journal of Composite Materials, 6*(4), 140-143.
30. **Widayani**, Viridi, S., & Khotimah, S.N. (2016). Binary Composite Fiber Elasticity Using Spring-Mass and Non-Interacting Parallel Sub-Fiber Model,

ICoSE Conference on Instrumentation, Environment and Renewable Energy (2015), Volume 2016.

31. Khotimah, S.N., Viridi, S., **Widayani**, Ain, T.N. & Wibowo, H.A.C. (2016). Predicting the Motion of an Intruder in a Vertically Vibrated 2D-Granular-Bed using Contact Points Approximation, *ICoSE Conference on Instrumentation, Environment and, Renewable Energy (2015)*, Volume 2016.
32. Aditya, D.I., Wella, S.A., **Widayani**, & Suprijadi. (2016). Electrical Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes Due to Compressive Load, *Key Engineering Materials, 675-676*, 109-112, Trans Tech Publications, Switzerland, http://www.ttp.net/1013-9826.html.
33. Yanti, Nurhayati, T., Royani, I., **Widayani**, & Khairurrijal. (2016). Synthesis and Characterization of MAA-based Molecularly-imprinted polymer (MIP) with D-glucose Template, *Journal of Physics: Conference Series 739 012143, 6th Asian Physics Symposium,* IOP Publishing.
34. Nurhayati, T., Yanti, Royani, I., **Widayani**, & Khairurrijal. (2016). Synthesis and Study of Guest-Rebinding of MIP Based on MAA Prepared using Theophylline Template, *Journal of Physics: Conference Series 739 (2016) 012143, 6th Asian Physics Symposium,* IOP Publishing.
35. Wungu, T.D.K., Fauzan, M.R.A., **Widayani**, & Suprijadi. (2016). A Density Functional Theory Study of a Calcium-Montmorillonite: A First Investigation for Medicine Application, *Journal of Physics: Conference Series 739 (2016) 012143, 6th Asian Physics Symposium,* IOP Publishing
36. **Widayani**, Yanti, Wungu, T.D.K., & Suprijadi. (2017). Preliminary Study of Molecularly Imprinted Polymer-based Potentiometric Sensor for Glucose, *Procedia Engineering, 170,* 84 – 87, Elsevier.
37. **Widayani**, Wungu, T.D.K., Marsha, S.E. & Suprijadi. (2017). Study of Target Recognition of MAA-based Molecularly Imprinted Polymer (MIP) Using Density Functional Theory (DFT) Computation on the Interaction of Methacrylic Acid (MAA)-D-Glucose. *Journal of Polymer and Biopolymer Physics Chemistry, 5*(1), 10-12. doi: 10.12691/jpbpc-5-1-2.
38. Khotimah, S.N., Viridi, S., & **Widayani**. (2017). Influence of initial velocity on trajectories of a charged particle in uniform crossed electric and magnetic fields, *Eur. J. Phys. 38*, 025204 (9pp), doi:10.1088/1361-6404/38/2/025204.
39. Khotimah, S.N., Viridi, S., **Widayani**, & Khairurrijal. (2018). Influence of Initial Velocity on Trajectories of a Charged Particle in Uniform Parallel Electric and Magnetic Fields, *The Online Journal of Science and Technology, 8*(2).

40. Aditya, I.D., **Widayani** & Suprijadi. (2018). Electronic Properties of Semiconducting Zigzag (10,0) Carbon Nanotubes Due to Uniaxial Strain, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13*(7).
41. **Widayani**. (2018). Pembelajaran Sains Berbasis Riset (Research Based Learning/RBL) di Perguruan Tinggi, *SNIPS*, Bandung.
42. **Widayani**, Wungu, T.D.K., & Viridi, S. (2019). The Influence of Tensile Angle Direction on the Young Modulus of Single and Combination of Two Anisotropic Materials, *International Journal of Composite Materials, 9*(2), 33-38. doi: 10.5923/j.cmaterials.20190902.01.
43. Sutrisno, W., Rahayu, M. & Adhika, D.R. (2020). Thermal Properties of Sago Fiber-Epoxy Composite, *Fibers, 8*(4), doi:10.3390/fib8010004.
44. Adhika, D. R., Prasetiyo, I., Noeriman, A., Hidayah, N., & Sutrisno, W. (2020). Sound Absorption Characteristics of Pineapple Leaf/Epoxy Composite, *Archives of Acoustics, 45*(2), 233-240.
45. Hamzens, A., Kurniawan, R., Adhika, D.R., **Widayani**, Nuruddin, A. (2021). Study of Particle Reduction Method and Particle Size Effect on TiO2 as Near-infrared Reflector Coating in Cotton Fabric, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 19*, 1−8.
46. **Widayani**, Noeriman, A., Wungu, T.D.K., & Adhika, D.R. (2022). Sound Absorption Characterisation of layered Arrangements of Pineapple Leaf Fiber-Epoxy Composite prepared by a Simple Mixing Hot Pressing Process, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2243 012047.
47. Genecya, G., Adhika, D.R., **Widayani** & Wungu, T.D.K. (2023). Optimization of mechanical properties of carrageenan-based bioplastic as food packaging, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1201* 012079.

VII. PENGHARGAAN

1. Satyalancana Karya Satya X Tahun
2. Satyalancana Karya Satya XX Tahun
3. Penghargaan Pengabdian 25 Tahun ITB
4. Satyalancana Karya Satya XXX Tahun
5. Penghargaan ITB dalam Rangka Dies ITB ke 61 Bidang Pengajaran tahun 2020

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen Kementerian Pendidikan Nasional

ITB PRESS
Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
+62 22 20469057
www.itbpress.id
office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532
fgb.itb.ac.id FgbItb FGB_ITB
@fgbitb_1920 Forum Guru Besar ITB

ISBN 978-623-297-319-0
9 786232 973190