



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL184834

TINJAUAN PENGARUH JENIS MATERIAL *SIZING TREATMENT* PADA SERAT KARBON TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK KOMPOSIT EPOKSI/SERAT KARBON

**HARDINA PUTRI KINANTY Z
NRP. 0251164000066**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR – TL 184834

TINJAUAN PENGARUH JENIS MATERIAL *SIZING TREATMENT* PADA SERAT KARBON TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK KOMPOSIT EPOKSI/SERAT KARBON

HARDINA PUTRI KINANTY Z
NRP. 0251164000066

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 184834

**A REVIEW OF THE EFFECT OF MATERIAL SIZING
TREATMENT ON CARBON FIBER ON MORPHOLOGY
AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY/CARBON
FIBER COMPOSITE**

HARDINA PUTRI KINANTY Z
NRP. 0251164000066

Advisors

Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

TINJAUAN PENGARUH JENIS MATERIAL *SIZING TREATMENT* PADA SERAT KARBON TERHADAP MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK KOMPOSIT EPOKSI/SERAT KARBON

TUGAS AKHIR

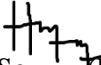

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

HARDINA PUTRI KINANTY Z

NRP 0251164000066

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc..... (Pembimbing I)
2. Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc. (Pembimbing II)



SURABAYA
Agustus 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**TINJAUAN PENGARUH JENIS MATERIAL SIZING
TREATMENT PADA SERAT KARBON TERHADAP
MORFOLOGI DAN SIFAT MEKANIK KOMPOSIT
EPOKSI/SERAT KARBON**

Nama : Hardina Putri Kinanty Z
NRP : 0251164000066
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

Abstrak

Komposit dapat menghasilkan material ringan dengan kekuatan tinggi. Epoksi adalah salah satu kelompok polimer termoset yang sering digunakan sebagai matriks pada komposit karena sifat mekanik nya yang baik. Serat karbon merupakan salah satu reinforcement yang paling diminati karena sifat mekanik nya yang luar biasa, menjadikannya sebagai penguat ideal dalam material komposit canggih. Namun serat karbon memiliki permukaan yang halus dan inert yang menghasilkan adhesi pada interface yang lemah dengan epoksi. Sizing adalah salah satu metode perlakuan pada permukaan untuk melindungi permukaan serat, selain itu juga dapat membantu meningkatkan sifat adhesi pada interface dengan matriks nya. Pada tinjauan ini telah di analisis terkait potensi dan keefektifan jenis material sizing yaitu polydopamin, silane coupling agent, epoksi, poliuretan, dan poliimida. Pengujian SEM, FTIR dan XPS dilakukan untuk mengetahui morfologi dari serat karbon dan komposit epoksi/serat karbon, sedangkan untuk mengetahui sifat mekanik komposit epoksi/serat karbon dilakukan dengan pengujian IFSS dan ILSS. Didapatkan bahwa epoksi adalah material sizing paling efektif untuk komposit epoksi/serat karbon.

Kata Kunci: *Komposit, Epoksi, Serat Karbon, Sizing.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

A REVIEW OF THE EFFECT OF MATERIAL SIZING TREATMENT ON CARBON FIBER ON MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY/CARBON FIBER COMPOSITE

Student Name : Hardina Putri Kinanty Z
NRP : 0251164000066
Department : Material dan Metallurgical Engineering
Advisor 1 : Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.
Advisor 2 : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

Abstract

Composites can produce lightweight with high strength materials. Epoxy is one of the thermoset polymer group that is often used as a matrix in composites because of its excellent mechanical properties. Carbon fiber is one of the most preferred reinforcement because of its excellent mechanical properties, making it as an ideal reinforcement in advanced composite material. However, carbon fiber has a smooth and inert surface, which results in a weak interfacial adhesion with epoxy. Sizing is one of the treatment methods on the surface to protect the surface of the fiber, but it also can help improve the adhesion properties at the interface with the matrix. This review has analyzed the potential and effectiveness of the type of sizing material used, such as polydopamine, silane coupling agent, epoxy, polyurethane, and polyimide. SEM, FTIR and XPS tests were carried out to determine the morphology of carbon fiber and epoxy/carbon fiber composites, while to determine the mechanical properties of epoxy/carbon fiber composites performed by IFSS and ILSS testing. It was found that epoxy is the most effective sizing material for epoxy/carbon fiber composites.

Keywords: *Composite, Epoxy, Carbon fiber, Sizing.*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Tinjauan Pengaruh Jenis Material *Sizing Treatment* pada Serat Karbon terhadap Morfologi dan Sifat Mekanik Komposit Epoksi/Serat Karbon” dengan baik dan dapat selesai tepat pada waktunya. Tujuan dari penyusunan Laporan Tugas Akhir adalah untuk memenuhi salah satu syarat akademis yang wajib dipenuhi dalam kuliah program studi Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS, Surabaya.

Terselesaikannya Laporan Tugas Akhir tidak luput dari bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberi kelancaran dalam proses mengerjakan Tugas Akhir hingga penyusunan laporan.
2. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. dan Ibu Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si. selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
4. Bapak Alvian Toto W, S.T., M.T. selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
5. Kedua orang tua dan adik-adik yang selalu memberikan dukungan serta doa untuk penulis.

Penulis menyadari penyusunan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat berguna bagi penulis dan semua pihak yang terkait.

Surabaya, 21 Juli 2020
Penulis

Hardina Putri Kinanty Z

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Tinjauan	3
1.5 Manfaat Tinjauan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Komposit	5
2.2 Serat Karbon	11
2.3 Epoksi	16
2.4 <i>Polydopamine</i>	21
2.5 <i>Silane Coupling Agent</i>	25
2.6 Poliuretan	29
2.7 Poliimida	31
2.8 Adhesi pada <i>Interface</i>	35
2.9 <i>Wet Chemical Treatment</i>	39
2.10 <i>Sizing Treatment</i>	42
2.11 Aplikasi Komposit Epoksi/Serat Karbon	45
2.12 Manufaktur Komposit	51
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir	53
3.2 Material dan Pengujian	55
3.2.1 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	57
3.2.2 <i>Fourier Transform Infra Red (FTIR)</i>	59
3.2.3 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)	61

3.2.4	<i>Interfacial Shear Strength (IFSS)</i>	63
3.2.5	<i>Interlaminar Shear Strength (ILSS)</i>	66
3.3	Ruang Lingkup Pembahasan.....	67

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	<i>Polydopamine</i>	69
4.1.1	Karakteristik Kimia Serat Karbon	69
4.1.2	Morfologi Serat Karbon dan Komposit	73
4.1.3	IFSS (<i>Interfacial Shear Strength</i>) dari Komposit	76
4.1.4	ILSS (<i>Interlaminar Shear Strength</i>)	76
4.2	<i>Silane Coupling Agent</i>	77
4.2.1	Karakteristik Kimia Serat Karbon	78
4.2.2	Morfologi Serat Karbon dan Komposit	81
4.2.3	IFSS (<i>Interfacial Shear Strength</i>) dari Komposit	84
4.2.4	ILSS (<i>Interlaminar Shear Strength</i>) dari Komposit	85
4.3	Epoksi	86
4.3.1	Karakteristik Kimia Serat Karbon	87
4.3.2	Morfologi Serat Karbon dan Komposit	89
4.3.3	IFSS (<i>Interfacial Shear Strength</i>) pada Komposit	92
4.3.4	ILSS (<i>Interlaminar Shear Strength</i>) pada Komposit	94
4.4	Poliuretan	94
4.4.1	Karakteristik Kimia Serat Karbon	95
4.4.2	Morfologi Serat Karbon dan Komposit	97
4.4.3	IFSS (<i>Interfacial Shear Strength</i>).....	99
4.4.4	ILSS (<i>Interlaminar Shear Strength</i>).....	100
4.5	Poliimida	101
4.5.1	Karakteristik Kimia Serat Karbon	102
4.5.2	Morfologi Serat Karbon	105
4.6	Analisis Tinjauan Pengaruh <i>Sizing Treatment</i>	106
4.6.1	Karakteristik Kimia Serat Karbon	106
4.6.2	Morfologi Serat Karbon dan Komposit	108

4.6.3	IFSS (<i>Interfacial Shear Strength</i>)	109
4.6.4	ILSS (<i>Interlaminar Shear Strength</i>).....	111
4.6.5	Aplikasi pada Komposit	113
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	115
5.2	Saran	116
DAFTAR PUSTAKA		117
LAMPIRAN.....		125
BIODATA PENULIS.....		143

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi dari beberapa jenis komposit.....	7
Gambar 2.2	Penumpukan berorientasi, lapisan yang diperkuat serat untuk komposit laminat.....	8
Gambar 2.3	Skema <i>cross-section</i> dari panel <i>sandwich</i>	9
Gambar 2.4	Proses pembuatan karbon dengan menggunakan <i>pitch</i> dan PAN sebagai prekursor.....	12
Gambar 2.5	Proses pembuatan serat karbon.....	12
Gambar 2.6	Proses stabilisasi pada serat PAN.....	13
Gambar 2.7	Struktur dari serat karbon <i>pitch</i> mesofasa	14
Gambar 2.8	Tekstur serat karbon A) PAN B) Pitch mesofasa	15
Gambar 2.9	Proses <i>weaving</i> serat.....	16
Gambar 2.10	Cincin Epoksi	17
Gambar 2.11	Skema reaksi pembuatan epoksi.....	17
Gambar 2.12	Reaksi poliadisi pada resin epoksi.....	19
Gambar 2.13	Reaksi homopolimerisasi pada resin epoksi.....	20
Gambar 2.14	Oksidasi dari Dopamin menjadi Polidopamin.....	21
Gambar 2.15	Struktur Umum PDA (atas) dan unit pirol karboksilat pada tingkat yang lebih rendah	22
Gambar 2.16	Oksidasi dopamin menjadi DHI	23
Gambar 2.17	Struktur umum dari <i>Silane Coupling agent</i>	25
Gambar 2.18	Mekanisme <i>silane coupling agent</i>	27
Gambar 2.19	Reaksi pembentukan poliuretan.....	30
Gambar 2.20	Reaksi antara kelompok amina dan anhidrida untuk membentuk kelompok imida	32
Gambar 2.21	Sintesis poliimida dari dianhidrida dan diisosiyanat.....	33
Gambar 2.22	Sintesis poliimida dari diamina dan <i>dithioanhydrides</i>	33
Gambar 2.23	Sintesis poliimida dari diamina dan <i>bis(maleimides)</i>	34
Gambar 2.24	Kondisi <i>wettability</i> yang berbeda	38

Gambar 2.25	Energi ikatan dan panjang ikatan dari gaya adhesi	38
Gambar 2.26	Metode modifikasi pada serat karbon	40
Gambar 2.27	Metode modifikasi pada serat karbon	41
Gambar 2.28	Ikatan pada <i>interface</i> dengan a) ikatan molekul, b) daya tarik elektrostatik, c) interdifusi unsur, d) reaksi kimia, e) reaksi kimia dengan membentuk unsur baru, f) <i>interlocking</i> mekanik	43
Gambar 2.29	Skema metode <i>sizing</i> dalam melindungi serat karbon	44
Gambar 2.30	Perbandingan kekuatan dan modulus spesifik komposit dengan beberapa logam <i>aerospace</i>	46
Gambar 2.31	Efisiensi struktural relatif dari bahan <i>aerospace</i>	46
Gambar 2.32	Beberapa jenis UAV berdasarkan sayapnya, a) <i>quadcopter</i> b) <i>tilt-wing</i> c) <i>fixed wing</i> dan d) sayap balon	48
Gambar 2.33	Contoh kapal <i>sea-going</i>	49
Gambar 2.34	Aplikasi CFRP pada a) otomotif b) <i>blade</i> turbin angin	50
Gambar 2.35	Turbin angin	51
Gambar 3.1	Diagram alir	53
Gambar 3.2	Diagram alir proses manufaktur komposit	54
Gambar 3.3	Mekanisme SEM	58
Gambar 3.4	Mekanisme FTIR	61
Gambar 3.5	Mekanisme XPS	63
Gambar 3.6	Metode untuk menentukan nilai IFSS	63
Gambar 3.7	Mekanisme <i>fiber pull out test</i>	64
Gambar 3.8	Mekanisme <i>microbond test</i>	64
Gambar 3.9	Spesimen pengujian SFFT	65
Gambar 3.10	Mekanisme pengujian SFFT	65
Gambar 3.11	Spesimen pengujian ILSS	66
Gambar 3.12	Mekanisme pengujian ILSS	67
Gambar 4.1	Mekanisme <i>sizing</i> dengan PDA	70

Gambar 4.2	Morfologi serat karbon a) tanpa perlakuan b) <i>sizing</i> PDA.....	74
Gambar 4.3	Hasil pengujian SEM a,b) <i>desized</i> -SCFs/EP c,d) PDA-SCFs/EP	75
Gambar 4.4	Mekanisme <i>sizing treatment</i> dengan SCA.....	79
Gambar 4.5	Serat karbon a) tanpa perlakuan b) <i>sizing</i> MS-SCA c) <i>sizing</i> APS-SCA d) <i>sizing</i> GPS-SCA	82
Gambar 4.6	Fraktur komposit epoksi/serat karbon a) tanpa perlakuan b) dengan <i>sizing</i> SCA.....	83
Gambar 4.7	Mekanisme <i>sizing treatment</i> dengan epoksi.....	87
Gambar 4.8	Serat karbon a) dengan <i>sizing</i> komersil b) <i>desized</i> c) dengan <i>sizing</i> epoksi.....	90
Gambar 4.9	Komposit a) CC b) CW c) CT d) CD	90
Gambar 4.10	Mekanisme <i>sizing treatment</i> dengan poliuretan.....	96
Gambar 4.11	Serat karbon a) <i>unsized</i> b) 0,4% poliuretan <i>sizing</i> c) 1% poliuretan <i>sizing</i>	98
Gambar 4.12	Komposit epoksi/serat karbon a) tanpa perlakuan b) <i>sizing</i> dengan <i>hyperbranched</i> poliuretan.....	98
Gambar 4.13	Mekanisme reaksi pembentukan poliimida	102
Gambar 4.14	Serat karbon a) sebelum <i>sizing</i> dengan poliimida b) sesudah <i>sizing</i> dengan poliimida....	105
Gambar 4.15	Grafik nilai IFSS dari masing-masing material <i>sizing</i>	110
Gambar 4.16	Grafik nilai ILSS dari masing-masing material <i>sizing</i>	113
Gambar 4.17	Grafik presentase kenaikan nilai IFSS dan ILSS dari masing-masing material <i>sizing</i>	113

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat dari beberapa Serat.....	15
Tabel 2.2	Sifat mekanik epoksi	20
Tabel 2.3	Sifat fisikokimia dan biologi PDA	24
Tabel 2.4	Jenis <i>Silane coupling agent</i> komersil	27
Tabel 2.5	Sifat dari <i>Silane coupling agent</i>	28
Tabel 2.6	Sifat mekanik dari poliuretan	31
Tabel 2.7	Sifat mekanik dari poliimida.....	35
Tabel 2.8	Tipe dasar dari adhesi.....	36
Tabel 2.9	Sifat mekanik material UAV	47
Tabel 2.10	Nilai minimal komposit.....	49
Tabel 2.11	Sifat mekanik CFRP untuk aplikasi otomotif.....	51
Tabel 2.12	Sifat mekanik CFRP untuk aplikasi <i>wind turbine blade</i>	51
Tabel 3.1	Material dan Pengujian.....	55
Tabel 3.2	Ruang Lingkup Pembahasan	67
Tabel 4.1	Hasil Pengujian FTIR dengan <i>sizing</i> PDA	70
Tabel 4.2	Hasil Pengujian XPS serat karbon dengan <i>sizing</i> PDA.....	71
Tabel 4.3	Komposisi atom pada permukaan serat karbon.....	72
Tabel 4.4	Hasil FTIR serat karbon dengan <i>sizing</i> SCA.....	79
Tabel 4.5	Komposisi pada permukaan serat karbon.....	81
Tabel 4.6	Hasil pengujian IFSS dengan <i>sizing</i> SCA	84
Tabel 4.7	Hasil FTIR serat karbon dengan <i>sizing</i> epoksi.....	87
Tabel 4.8	Hasil pengujian XPS dengan <i>sizing</i> epoksi	88
Tabel 4.9	Hasil pengujian IFSS	93
Tabel 4.10	Hasil Pengujian XPS dengan <i>sizing</i> poliuretan.....	96
Tabel 4.11	Hasil pengujian IFSS komposit dengan <i>sizing</i> poliuretan.....	100
Tabel 4.12	Hasil FTIR serat karbon dengan <i>sizing</i> poliimida.....	103

Tabel 4.13	Hasil XPS serat karbon dengan <i>sizing</i> poliimida.....	103
Tabel 4.14	Rasio O/C, N/C, dan Si/C dari masing-masing material <i>sizing</i>	107
Tabel 4.15	Nilai IFSS dari masing-masing material <i>sizing</i>	111
Tabel 4.16	Nilai ILSS serat karbon dengan <i>sizing</i>	112

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang ilmu material seiring berjalannya zaman akan semakin berkembang, bahan konvensional seperti logam akan sulit untuk memenuhi keperluan dalam industri seiring berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang ilmu material ini. Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi ini meningkatkan permintaan akan material komposit, banyak industri yang beralih ke penggunaan material komposit karena material komposit dapat menghasilkan material dengan kombinasi sifat yang tidak ada pada salah satu bahan komponen, dan juga untuk menggabungkan karakteristik terbaik dari masing-masing bahan komponen, sehingga material komposit mudah untuk di rekayasa sesuai dengan aplikasi yang diinginkan. Dibandingkan dengan bahan logam konvensional, komposit memiliki sifat unggul dengan rasio kekuatan-berat yang sangat baik, ketahanan terhadap korosi, kinerja *fatigue*, dan fleksibilitas dalam desain (Y. Ren, dkk. 2020).

Unsur-unsur yang terdapat pada komposit yaitu *reinforcemnet* dan matriks, dimana fungsi *reinforcement* yaitu memberikan kekuatan dan kekakuan pada komposit, sedangkan matriks memiliki fungsi mempertahankan *reinforcement* dalam orientasi dan jarak yang tepat dan melindungi mereka dari abrasi dan lingkungan (Campbell, 2010). Polimer menjadi bahan yang paling sering di pakai sebagai matriks dalam pembuatan komposit. Komposit dengan matriks komposit atau yang biasa di sebut PMC (*Polymer Matrix Composite*) jauh lebih mudah untuk difabrikasi daripada komposit dengan matriks logam dan matriks keramik, baik itu termoset atau termoplastik. PMC membutuhkan temperatur yang relatif rendah untuk proses fabrikasi nya dibandingkan dengan matriks jenis lainnya (Y. Freile-Pelegrin dan T. J. Madera-Santana, 2017). Epoksi adalah salah satu kelompok polimer termoset yang sering digunakan sebagai

matriks pada komposit, epoksi menjadi pilihan untuk aplikasi seperti pelapisan, isolator listrik, dirgantara, industri marinir, dan masih banyak lagi karena epoksi memiliki keunggulan yaitu ketahanan terhadap panas dan bahan kimia yang baik, kemampuan proses yang mudah, biaya rendah, kinerja yang baik pada suhu yang tinggi, dan *shrinkage* yang rendah (Zhanjun Wu, dkk. 2014)

Serat, seperti serat polimer, serat gelas, dan serat karbon, telah banyak digunakan dalam beberapa tahun terakhir sebagai *reinforcement* pada komposit. Serat karbon menjadi serat yang paling diminati karena sifat mekanik nya yang luar biasa, menjadikannya sebagai penguat ideal dalam material komposit canggih (Jiang dkk, 2015). Selain itu serat karbon memiliki kemampuan tahan terhadap suhu tinggi dan stabilitas kimia sehingga serat karbon menjadi penguat yang ideal untuk komposit canggih (Renliang Ma, dkk. 2018). Dua sektor utama aplikasi dari serat karbon adalah dirgantara dan rekayasa nuklir, selain itu rekayasa umum dan sektor transportasi, yang mencakup komponen teknik seperti *bearings*, *gears*, *fan blade*, dan badan mobil yang membutuhkan sifat mekanik yang baik (Tiwari dan Bijwe, 2014). Karena serat karbon memiliki permukaan yang halus inert, serat karbon sering menunjukkan daya rekat yang buruk terhadap polimer. Untuk meningkatkan sifat mekanik komposit, kekuatan adhesi *interface* harus kuat karena kekuatan adhesi pada *interface* memiliki peran penting pada sifat mekanik komposit (Jang dan Yang, 2000). Serat karbon yang murni memiliki permukaan yang inert, yang menghasilkan adhesi pada *interface* yang lemah dengan matriks nya. Oleh karena itu, modifikasi permukaan serat diperlukan untuk meningkatkan kekuatan *interface* dan sifat kompositnya, salah satunya yaitu dengan teknik *sizing*. Selain melindungi permukaan serat karbon dari kerusakan, *sizing* juga dapat membantu meningkatkan sifat adhesi pada *interface* dengan matriks nya, komposisi dari *sizing* merupakan faktor penting dalam kinerja komposit (Zhang, 2015). Tinjauan ini menganalisis terkait potensi dan keefektifan jenis

material *sizing* yang digunakan yaitu *polydopamina* (PDA), *silane coupling agent* (SCA), epoksi, poliuretan dan poliimida terhadap morfologi serat karbon, morfologi komposit epoksi/serat karbon, dan sifat mekanik dari komposit epoksi/serat karbon.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada tinjauan ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh jenis material *sizing treatment* pada serat karbon terhadap morfologi serat karbon?
2. Bagaimana pengaruh jenis material *sizing treatment* pada serat karbon terhadap morfologi dan sifat mekanik komposit epoksi/serat karbon?
3. Bagaimana menentukan jenis material *sizing treatment* yang paling efektif untuk komposit epoksi/serat karbon?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tinjauan ini agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau adalah sebagai berikut:

1. Tinjauan ini tidak membahas perbedaan proses manufaktur komposit dan pengaruh kondisi lingkungan terhadap sifat mekanik komposit.
2. Tinjauan ini tidak membahas perbedaan proses manufaktur *sizing treatment* dan pengaruh kondisi lingkungan terhadap morfologi dan sifat mekanik komposit.
3. Tinjauan ini tidak membahas perbedaan metode dalam proses pengujian dan karakterisasi.

1.4 Tujuan Tinjauan

Tujuan dari tinjauan ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh jenis material *sizing treatment* pada serat karbon terhadap morfologi serat karbon.

2. Menganalisis pengaruh jenis material *sizing treatment* pada serat karbon terhadap morfologi dan sifat mekanik komposit epoksi/serat karbon.
3. Menganalisis jenis material *sizing treatment* yang paling efektif untuk komposit epoksi/serat karbon.

1.5 Manfaat Tinjauan

Tinjauan ini bertujuan untuk memperoleh jenis material *sizing* yang paling efektif dan berpotensi untuk meningkatkan sifat mekanik dari komposit epoksi/serat karbon dan dapat digunakan sebagai tinjauan pengembangan selanjutnya mengenai komposit epoksi/serat karbon.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposit

Komposit adalah material yang memiliki lebih dari satu fasa atau multi-fasa dengan tujuan mencapai kombinasi baru dari sifat-sifat fasa penyusunnya dibandingkan ketika mereka berdiri sendiri dan juga menggabungkan karakteristik terbaik dari masing-masing bahan komponen (Callister, 2007). Material komposit dapat didefinisikan sebagai material yang memiliki kombinasi sifat terbaik dari bahan penyusunnya dan dapat di buat sesuai sifat mekanik yang dibutuhkan dalam aplikasi. Keuntungan utama dari material komposit adalah kekuatan dan kekakuannya yang tinggi, dikombinasikan dengan *density*-nya yang rendah.

Unsur-unsur yang terdapat pada komposit yaitu *reinforcement* atau penguat dan matriks. *Reinforcement* memberikan kekuatan dan kekakuan, *reinforcement* dalam banyak kasus sifatnya lebih keras, lebih kuat, dan lebih kaku daripada matriks. Penguat biasanya serat atau partikel. Matriks memiliki fungsi mempertahankan *reinforcement* dalam orientasi dan jarak yang tepat dan melindungi mereka dari abrasi dan lingkungan (Campbell, 2010). Matriks memiliki fungsi yaitu sebagai fasa yang memberi bentuk kepada struktur komposit dengan mengikat penguat atau serat, maka dari itu matriks juga berperan sebagai pengikat atau penyangga yang menjaga kedudukan antar fasa penguat. Matriks juga memiliki fungsi lain yaitu mentransfer tegangan kerja kepada penguat, melindungi penguat dari kerusakan-kerusakan lingkungan dan kerusakan antar-serat berupa abrasi, menyelubungi serat yang umumnya getas, melindungi dari reaksi korosi dan kelembaban lingkungan, memisahkan serat untuk mengurangi kegagalan serat-individu dan tidak merusak komponen secara keseluruhan, selain itu matriks juga mengabsorpsi energi regangan jika terjadi perambatan retak dalam matriks yang mengenai serat untuk melepas ikatan (*debond*) dari serat individu. Karakteristik matriks

biasanya ulet, serta kekuatan dan rigiditas nya lebih renda dibanding penguat nya. Bahan matriks yang biasanya digunakan pada komposit yaitu matriks logam, matriks polimer, dan matriks keramik (Sulistijono, 2012).

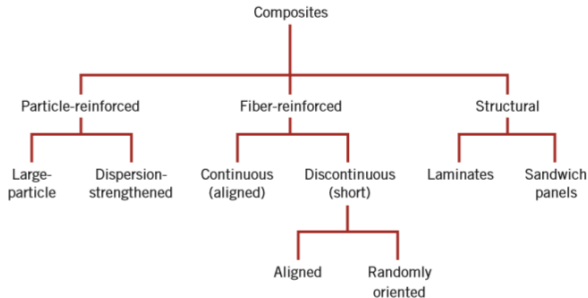
Polymer-matrix composites (PMC) adalah komposit yang memiliki polimer sebagai matriksnya. Termoset dimulai sebagai resin dengan viskositas rendah yang bereaksi dan *curing* selama pemrosesan, karena itu resin tidak dapat diproses kembali dengan pemanasan ulang. Termoplastik adalah resin dengan viskositas tinggi yang diproses dengan memanaskannya di atas suhu lelehnya, termoplastik dapat dipanaskan di atas suhu lelehnya untuk pemrosesan tambahan (Campbell, 2010).

Metal-matrix composite (MMC) yaitu metal sebagai matriksnya memiliki *density* yang rendah, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, retensi kekuatan suhu tinggi, dan ketahanan *creep*, *fatigue*, dan keausan yang sangat baik, memiliki potensi untuk menggantikan besi tuang dan bahan-bahan lain dalam mesin dan rem. Biasanya, MMC yang dipertimbangkan untuk aplikasi otomotif mengandung silikon karbida (SiC), aluminium oksida (Al_2O_3) atau partikel keramik lainnya atau serat pendek dalam paduan ringan, seperti aluminium, magnesium dan titanium (Mallick, 2012).

Ceramic-matrix composite (CMC) yaitu komposit yang memiliki keramik sebagai matriksnya yang digunakan karena memiliki keunggulan untuk aplikasi temperatur tinggi, insulator panas, dan isolator listrik. Oksida aluminium, oksida zirconium, oksida silikon, dan semen adalah beberapa keramik yang digunakan sebagai matriks komposit. Dalam bentuk cermet, matriks oksida logam diberi pengisi atau *filler* untuk meningkatkan konduktifitas listrik atau partikel logam untuk meningkatkan keuletannya (Sulistijono, 2012).

Reinforcement atau fase penguat memberikan kekuatan dan kekakuan. Dalam kebanyakan kasus, *reinforcemenet* lebih keras, lebih kuat, dan lebih kaku daripada matriks. Penguat biasanya berbentuk serat atau partikel. Terdapat klasifikasi dari komposit

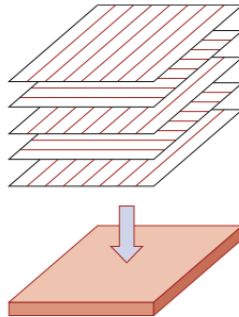
berdasarkan fase penguatnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Klasifikasi dari beberapa jenis komposit (Callister, 2007).

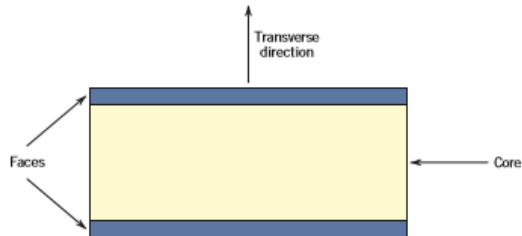
Komposit partikulat memiliki dimensi yang kira-kira sama di semua arah. Berbentuk bulat, platelet, atau geometri reguler atau tidak teratur. Komposit partikulat cenderung jauh lebih lemah dan kurang kaku dari komposit serat kontinu, tetapi biasanya jauh lebih murah.

Serat memiliki panjang yang jauh lebih besar dari diameternya. Rasio *length-to-diameter* (l/d) dikenal sebagai rasio aspek dan dapat sangat bervariasi. Serat kontinu memiliki rasio aspek yang panjang, sementara serat diskontinu memiliki rasio aspek pendek. Contoh dari serat kontinu yaitu unidireksional, *woven cloth*, dan *helical winding*, sedangkan untuk serat diskontinu yaitu *chopped fibers* dan *random mat*. Semakin kecil diameter serat, semakin tinggi kekuatannya, tetapi seringkali biaya meningkat karena diameternya menjadi lebih kecil. Selain itu, serat kekuatan tinggi berdiameter kecil memiliki fleksibilitas yang lebih besar dan lebih dapat menerima proses fabrikasi. Contoh dari serat yaitu kaca, aramid, dan karbon (Campbell, 2010). Kekakuan dan kekuatan komposit bergantung kepada arah dari serat, dimana arah serat menunjukkan nilai tertinggi dari kekakuan dan kekuatan suatu komposit (Sulistijono, 2012).



Gambar 2.2 Penumpukan berorientasi, lapisan yang diperkuat serat untuk komposit laminat (Callister, 2007).

Komposit yang mengandung lebih dari satu jenis pengisi dan/atau lebih dari satu jenis matriks disebut komposit hibrida. Komposit hibrida umumnya digunakan untuk meningkatkan sifat dan/atau menurunkan biaya komposit konvensional (Chung, 1994). Komposit struktural biasanya terdiri dari material homogen dan komposit, sifat-sifatnya tidak hanya bergantung pada sifat-sifat bahan penyusunnya tetapi juga pada desain geometris dari berbagai elemen struktural (Callister, 2007). Komposit laminat terdiri dari beberapa lapisan lamina berpenguat yang homogen ataupun kombinasi dari lamina-lamina dengan material yang berbeda dimana lapisan tersebut saling terikat (Sulistijono, 2012) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. *Sandwich panels* yang dapat dilihat pada Gambar 2.3 terdiri dari dua lapisan luar terbuat dari bahan yang relatif kaku dan kuat yang akan memberikan kekakuan dan kekuatan yang tinggi pada struktur, dan harus cukup tebal untuk menahan tarik dan tekan, sedangkan lapisan dalam atau intinya ringan, dan biasanya memiliki modulus elastisitas yang rendah (Callister, 2007).



Gambar 2.3 Skema *cross-section* dari panel *sandwich* (Callister, 2007).

Keuntungan dari penggunaan material komposit selain kekauan dan kekuatan yang tinggi dan *density* yang rendah, material komposit juga mudah dibentuk untuk bentuk yang kompleks, mudah untuk terikat, konduktivitas listrik rendah dan ekspansi termal, resistensi *fatigue* yang baik. Sedangkan kekurangan dari material komposit beberapa biaya bahan baku dari material komposit tidak murah, waktu pengembangan yang panjang, daktilitas yang rendah, beberapa komposit tidak dapat diaplikasikan pada suhu yang terlalu tinggi, lembab, dan kerusakan yang tidak dapat di deteksi.

Proses manufaktur yang biasanya digunakan untuk membuat komposit yaitu *hand lay-up* diawali dengan preparasi cetakan, pelapisan cetakan, *lay-up*, dan *curing* (Jamir, dkk. 2018), *resin transfer molding* (RTM) satu set cetakan bagian di isi dengan *reinforcement*, resin kemudian dipompa dimasukkan ke dalam cetakan, lalu dibiarkan *curing*, *pultrusion* diawali dengan serat secara terus menerus melalui rendaman matriks resin, diikuti dengan menjatuhkannya ke dalam cetakan yang dipanaskan sebelumnya atau satu set cetakan (Adrian dan Gheorghe, 2010), *filament winding* yaitu proses dimana serat kontinu diposisikan secara akurat dalam pola yang telah ditentukan untuk membentuk silinder, melalui rendaman resin dan kemudian secara terus-menerus digulung ke mandrel, setelah jumlah lapisan yang sesuai telah diterapkan, *curing* dilakukan, setelah itu mandrel di lepas (Callister, 2007) dan masih banyak proses manufaktur lainnya.

Pencampuran serat dengan matriks dari komposit adalah salah satu faktor yang akan mempengaruhi sifat mekanik dari komposit. Untuk merancang sebuah komposit dengan sifat mekanik yang diinginkan, ada beberapa rumus yang digunakan untuk mencampur matriks dan serat. Volume, massa, dan densitas komposit dapat di hitung menggunakan rumus yang ditunjukkan pada Persamaan 2.1, Persamaan 2.2, dan Persamaan 2.3 (Sulistijono, 2012),

$$v_c = v_f + v_m \quad (2.1)$$

$$w_c = w_f + w_m \quad (2.2)$$

$$\rho_c \cdot v_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m \quad (2.3)$$

Dimana:

v_c : volume komposit

v_f : volume serat

v_m : volume matriks

w_c : massa komposit

w_f : massa serat

w_m : massa matriks

ρ_c : densitas komposit

ρ_f : densitas serat

ρ_m : densitas matriks

Dari persamaan tersebut bisa di hitung fraksi volume dan fraksi massa dari komposit dengan rumus yang ditunjukkan pada Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.5,

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} ; V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2.4)$$

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} ; W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (2.5)$$

Dimana:

V_f : fraksi volume serat

V_m : fraksi volume matriks

W_f : fraksi massa serat

W_m : fraksi massa matriks

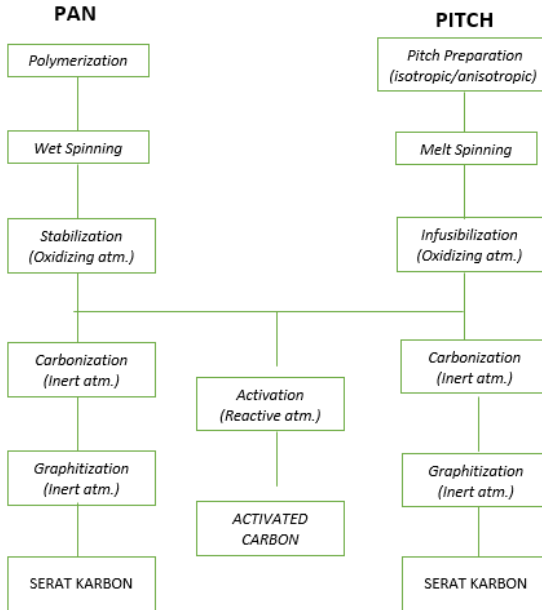
Jika diketahui densitas dari serat dan matriks maka bisa di konversi dari fraksi volume dan fraksi massa yang ditunjukkan pada Persamaan 2.6,

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot W_f ; V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot W_m \quad (2.6)$$

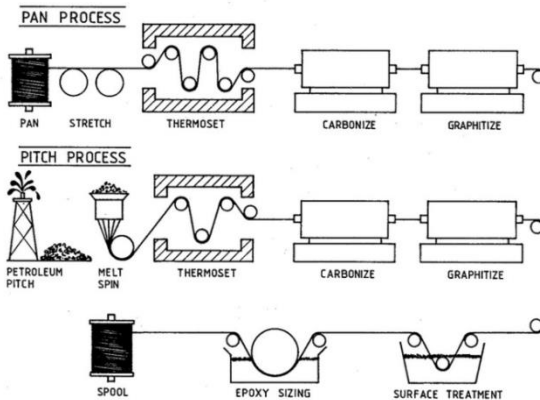
2.2 Serat Karbon

Serat karbon mengandung kurang lebih 92 wt% karbon (Fitzer, 1990). Serat karbon yang tersedia secara komersial dibagi menjadi tiga kategori yaitu *General-Purpose* (GP), *High-Performance* (HP), dan *Activated Carbon Fiber* (ACF). Jenis GP dicirikan oleh struktur amorf dan isotropik, kekuatan tarik rendah, modulus tarik rendah, dan biaya rendah. Tipe HP memiliki sifat kekuatan dan modulus yang relatif tinggi, modulus yang lebih tinggi dikaitkan dengan proporsi grafit yang lebih tinggi dan lebih anisotropik. ACF ditandai dengan kehadiran sejumlah besar mikropori terbuka, yang bertindak sebagai situs adsorpsi (Chung, 1994). Serat karbon komersial dibuat dengan tiga prekursor organik yang berbeda yaitu menggunakan rayon, pitch, dan polyacrylonitrile (PAN) (Callister, 2007). Proses pembuatan serat karbon ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5.

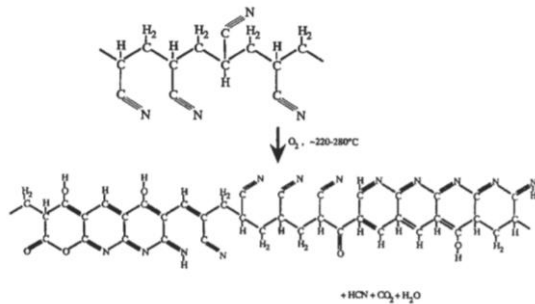
Serat prekursor dibuat dengan teknik *spinning* konvensional, seperti *wet spinning* untuk PAN dan *melt spinning* untuk pitch. Mereka harus dikonversi ke bentuk yang tahan api dan stabil pada suhu tinggi (>700°C) yang terjadi di dalam karbonisasi. Oleh karena itu, sebelum karbonisasi (pirolisis), mereka distabilkan untuk PAN seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6, atau diinfusibasi untuk pitch dalam atmosfer oksidasi. Setelah itu, serat GP dan HP diperoleh dengan karbonisasi di atmosfer inert, diikuti oleh grafitisasi >2500°C di atmosfer inert jika modulus tinggi diinginkan sedangkan ACF diperoleh dengan mengaktifkan di atmosfer reaktif, seperti uap pada suhu tinggi. Untuk pitch sebagai prekursor, pitch isotropik memberikan serat karbon isotropik, yang termasuk dalam kategori serat GP, sedangkan pitch anisotropik (seperti pitch mesofasa) memberikan serat HP.



Gambar 2.4 Proses pembuatan karbon dengan menggunakan pitch dan PAN sebagai prekursor (Chung, 1994).

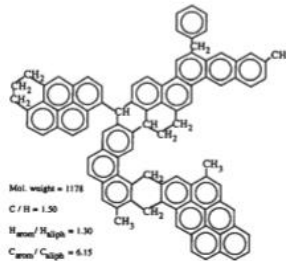


Gambar 2.5 Proses pembuatan serat karbon (ASM Internasional, 2001).



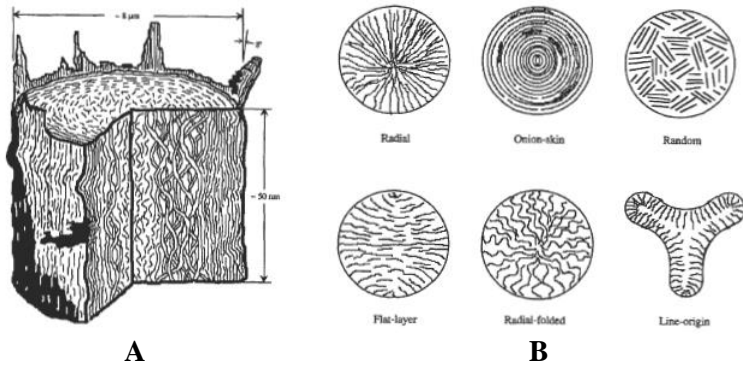
Gambar 2.6 Proses stabilisasi pada serat PAN (Burchell, 1999).

Di antara serat HP, serat berbasis *pitch* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, dapat mencapai modulus lebih tinggi daripada serat berbasis PAN, karena *pitch* lebih mudah di grafitisasi daripada PAN yang bersifat turbostatik dimana serat berbasis PAN terbatas untuk mengembangkan kekakuan atau konduktivitas termalnya, sedangkan untuk kekuatan tarik dan *elongation* serat berbasis PAN lebih tinggi dibandingkan serat berbasis *pitch* karena gaya geser lebih mudah antara lapisan karbon dalam serat grafitisasi, *pitch* lebih mudah di grafitisasi daripada PAN, dan struktur grafit yang berorientasi menyebabkan serat lebih sensitif terhadap cacat permukaan dan cacat struktural. Serat karbon berbasis *pitch* mesofasa saat ini paling mahal, karena biaya pemrosesan, selanjutnya serat berbasis PAN lalu serat berbasis *pitch* isotropik. Kekuatan tarik naik maka harga juga naik (Chung, 1994; Burchell, 1999).



Gambar 2.7 Struktur dari serat karbon *pitch* mesofasa (Burchell, 1999).

Serat karbon berbasis PAN menunjukkan mikrostruktur fibrilar. Mikrostruktur serat berbasis PAN ditunjukkan pada Gambar 2.8, dapat dilihat sebagai daerah pita bergelombang. Dengan demikian struktur jauh lebih tahan terhadap kegagalan tarik prematur yang dihasilkan dari cacat mikroskopis daripada mikrostruktur yang menunjukkan daerah grafit yang lebih luas melintang ke sumbu serat, seperti yang terlihat pada serat karbon berbasis pitch mesofasa. Dengan demikian, serat berbasis PAN cenderung memiliki kekuatan tarik yang luar biasa, tetapi kurang cocok untuk aplikasi modulus tarik tinggi. Sifat-sifat serat karbon berbasis pitch mesofasa dapat bervariasi secara signifikan dengan tekstur serat. Serat mesofasa biasanya menunjukkan bahwa struktur grafit menyatu ke arah pusat serat. Tekstur radial ini berkembang ketika aliran dikembangkan sepenuhnya selama ekstrusi melalui *spinnerette*. Tekstur serat karbon berbasis pitch mesofasa ini adalah refleksi langsung dari struktur molekul yang mendasarinya. Serat juga dapat dibentuk tanpa tekstur yang jelas. Pembuatan tekstur *random* melibatkan gangguan total dari aliran yang sedang berjalan. Ekstrusi melalui kapiler berdiameter besar dapat menghasilkan serat dengan tekstur konsentris. Untuk tekstur *onion skin* dapat diproduksi dengan mengaduk pitch hulu dari kapiler dan, dengan demikian, menginduksi komponen kecepatan tangensial.



Gambar 2.8 Tekstur serat karbon A) PAN B) Pitch mesofasa (Burchell, 1999)

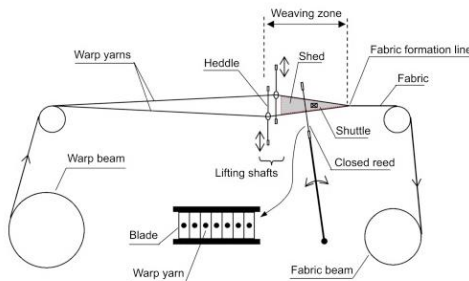
Tabel 2.1 Sifat dari beberapa Serat (Askeland, 1989).

Material	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (GPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Melting Temperature (°C)	Specific Modulus (10 ⁶ m)	Specific Strength (10 ⁴ m)
E-glass	2,55	3,4	72,4	<1725	2,90	14
S-glass	2,50	4,5	86,9	<1725	3,56	18
Karbon (High-Strength)	1,50	5,7	280	3700	18,8	19
Karbon (High-Modulus)	1,50	1,9	530	3700	36,3	13
Kevlar	1,44	4,5	120	500	8,81	25,7

Sifat-sifat serat karbon sangat bervariasi tergantung pada struktur serat. Secara umum sifat-sifat serat karbon yaitu *density* rendah sekitar 1,78-2,15 g/cm³ (Callister, 2007), modulus dan kekuatan tarik tinggi, koefisien ekspansi termal rendah, stabilitas termal tanpa adanya oksigen hingga lebih dari 300°C, ketahanan *creep* yang baik, stabilitas kimia, biokompatibilitas, konduktivitas termal yang tinggi, resistivitas listrik yang rendah, ketersediaan dalam bentuk kontinu, dan mengurangi biaya (terhadap waktu). Serat karbon HP banyak digunakan dalam komposit untuk pesawat terbang karena ringan untuk tujuan penghematan bahan

bakar dan juga karena ketahanannya terhadap temperature tinggi (Chung, 1994). Sifat dari serat karbon dibandingkan beberapa serat lainnya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

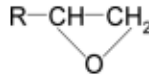
Komposit serat karbon mengacu pada komposit di mana setidaknya salah satu pengisi adalah serat karbon, baik pendek atau kontinu, searah atau *multidirectional*, *woven* atau bukan *woven*. Serat karbon yang sering digunakan pada komposit yaitu serat karbon *woven* (Chung, 1994). Serat karbon *woven* dapat dibuat dengan proses *weaving*. Selama proses *weaving*, serat *warp* biasanya direntangkan dalam garis lurus, kemudian serat *weft* dijalin melintasi bagian atas dan bawah dari serat *warp* (Farboodmanesh, dkk, 2019) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



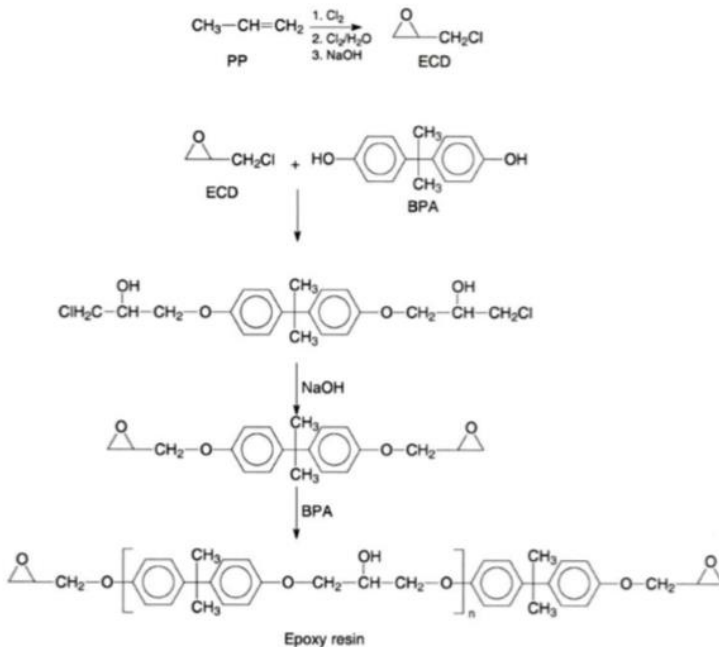
Gambar 2.9 Proses *weaving* serat (Koncar, 2019)

2.3 Epoksi

Epoksi adalah salah satu polimer dalam kelompok termoset yang memiliki peran penting dalam material komposit, epoksi banyak diaplikasikan pada sektor automotif, konstruksi, dan industri dirgantara karena kekuatannya yang baik, stabilitas dimensi, *wettability* yang baik, tahan terhadap api, daya tahan terhadap bahan kimia yang baik, dan *shrinkage* yang rendah saat mengalami *curing*. Struktur dari epoksi yaitu oksiran atau kelompok *glycidyl* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Cincin Epoksi (Paluvai, dkk. 2014).



Gambar 2.11 Skema reaksi pembuatan epoksi (Ratna, 2009).

Resin epoksi yang paling umum yaitu diglycidyl ether yang berasal dari bisphenol A (DGEBA), yang dihasilkan dengan mereaksikan *epichlorohydrin* (ECD) dengan bisphenol A (BPA) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. ECD dihasilkan dari polipropena dengan mereaksikan klorin dengan natrium hidroksida, ECD bereaksi dengan BPA dengan keberadaan natrium hidroksida. Setelah itu pembukaan cincin oksiran ECD oleh kelompok hidroksil BPA, setelah itu terjadi siklisasi yang menghasilkan epoksi, selanjutnya ekstensi rantai dengan

menggunakan BPA yang menghasilkan resin epoksi (Ratna, 2009).

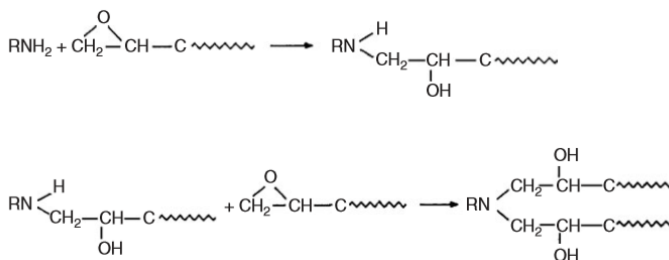
Selain resin DGEBA, terdapat beberapa resin epoksi lainnya, seperti epoksi *novolacs*, *glycidyl ether* yang berasal dari *tetraphenolethane*, resin *bisphenol F*, resin alifatik dan sikloalifatik, *Glycidyl Ethers* yang berasal dari *Aliphatic Polyols*, dan resin epoksi *brominated*.

- Resin epoksi *novolac* adalah cairan dengan viskositas tinggi, yang memiliki waktu *curing* lebih cepat dibandingkan dengan resin epoksi DGEBA. Resin epoksi *novolac* disintesis dengan reaksi di antara *phenolic* atau *cresol novolacs* dengan ECD seperti resin *bisphenol A*, jumlah gugus epoksi per molekul tergantung pada jumlah hidroksil dalam molekul *phenol novolac*.
- Resin *glycidyl ether* yang berasal dari *tetraphenolethane* mirip dengan resin epoksi *novolac*, biasanya digunakan dalam campuran dengan resin cair yang memiliki berat molekul rendah. Konten cincin aromatik yang tinggi dikombinasikan dengan polifungsionalitas yang memberikan kenaikan stabilitas termal untuk aplikasi suhu tinggi. Ketahanan kimia dan ketahanan kelembaban dari resin *glycidyl ether of tetraphenolethane* yang sudah *curing* juga sangat bagus.
- Resin *bisphenol F* (DGEBF) di preparasi dengan formaldehid dan fenol. DGEBF memiliki viskositas yang lebih rendah dibanding dengan DGEBA. DGEBF telah dikembangkan untuk memberikan resin epoksi yang sudah *curing* dengan fleksibilitas yang lebih besar dan temperatur pelunakan yang lebih rendah daripada resin epoksi DGEBA.
- Resin epoksi alifatik dan sikloalifatik telah dihasilkan dari epoksidasi senyawa olefinik. Proses epoksidasi melibatkan penggunaan senyawa olefin atau poliolefin dan zat pengoksidasi perasid seperti hidrogen peroksida, oksigen molekuler, atau bahkan udara. Resin epoksi sikloalifatik

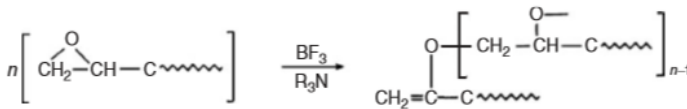
memiliki viskositas yang rendah, maka dari itu sering digunakan untuk mengencerkan resin epoksi lainnya dan memiliki kekuatan tarik yang relatif rendah dan karena mereka tidak bisa *curing* dengan baik pada suhu kamar, sedangkan resin epoksi alifatik digunakan dalam kombinasi dengan resin epoksi lainnya untuk meningkatkan waktu *curing*, fleksibilitas, dan suhu defleksi panas.

- *Glycidyl Ethers* yang berasal dari *Aliphatic Polyols* dibuat dengan mereaksikan poliol dengan ECD dengan adanya katalis, resin ini memberikan fleksibilitas yang lebih besar dan temperatur pelunakan yang lebih rendah.
- Resin epoksi *brominated* terbentuk dari produk reaksi ECD dan *brominated bisphenol A*. Resin ini tidak mudah terbakar seperti DGEBA, resin ini memperoleh karakteristik tersebut melalui substitusi brom pada cincin fenil dari cincin *bisphenol A*.

Resin epoksi mampu bereaksi dengan berbagai bahan *curing* atau dengan sesama epoksi melalui katalis untuk membentuk padatan, maka dari itu terdapat dua tipe reaksi *curing* pada epoksi yaitu poliadiasi dan homopolimerisasi. Reaksi poliadiasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12, adalah jenis reaksi yang paling umum digunakan untuk *curing* resin epoksi, bahan *curing* yang digunakan dalam jenis reaksi ini memiliki senyawa aktif hidrogen, dan termasuk amina, amida, dan merkaptan.



Gambar 2.12 Reaksi poliadiasi pada resin epoksi (Petrie, 2006)



Gambar 2.13 Reaksi homopolimerisasi pada resin epoksi (Petrie, 2006)

Reaksi homopolimerisasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 menggunakan katalis, dimana katalis tidak membentuk bagian dari struktur jaringan epoksi akhir atau memiliki efek signifikan pada sifat akhir resin (Petrie, 2006).

Sifat mekanik dari epoksi dapat dilihat pada Tabel 2.2. *Specific gravity* bisa didapatkan dengan dengan pengujian *density* yaitu dengan standar ASTM D792 (Shrivastava, 2018). *Solid content* bisa didapatkan menggunakan *thermogravimetric analysis mass spectrometry* (TGA-MS), alat ini menguji perubahan berat pada sampel dengan pemanasan yang di kontrol. *Weght loss* yang didapatkan dari pengujian ini akan memberikan *solid content* (Abraham, dkk, 2018). *Tensile strength* dan *tensile modulus* bisa didapatkan dari pengujian tarik. *Impact strength* bisa didapatkan dengan pengujian impak. *Gel point* bisa didapatkan dengan *dynamic mechanical analysis*. Gaya diberikan kepada sampel dan nantinya didapatkan deformasi sesuai sampel, selain itu didapatkan elastisitas dan viskositas dengan fungsi temperatur atau waktu. Temperatur *glass* transisi juga didapatkan ketika *storage modulus* mengalami penurunan drastis dan *loss modulus* mengalami peningkatan (Shrivastava, 2018).

Tabel 2.2 Sifat mekanik epoksi (Saw, dkk, 2013)

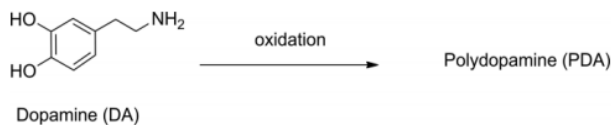
Sifat	Evaluation
Wujud (warna)	Milky white liquid
<i>Specific gravity</i> pada 25°C (gr/cc)	1,12
Viskositas pada 25°C (centipoises)	550
Titik gel dalam menit	26
<i>Solid content</i> (%)	84

<i>Tensile Strength</i> (MPa)	69
<i>Tensile Modulus</i> (MPa)	166
<i>Impact Strength</i> (kJ/m ²)	1.1

2.4 Polydopamine

Proses kimia yang terinspirasi dari kerang dengan teknik untuk menyesuaikan sifat permukaan material ini terinspirasi oleh adhesi protein kaki kerang, yang mengandung lisin dan dihidroksifenilalanin (DOPA). Kelompok katekol dalam DOPA dapat berinteraksi dengan substrat melalui koordinasi, ikatan hidrogen, interaksi elektrostatis, interaksi hidrofobik, dan bahkan reaksi kovalen. Dopamin (DA) merupakan molekul dengan kedua kelompok katekol dan amino, dapat mempolimerisasi diri untuk membentuk lapisan konformal pada berbagai permukaan dalam kondisi disekitarnya (Wang, dkk. 2019).

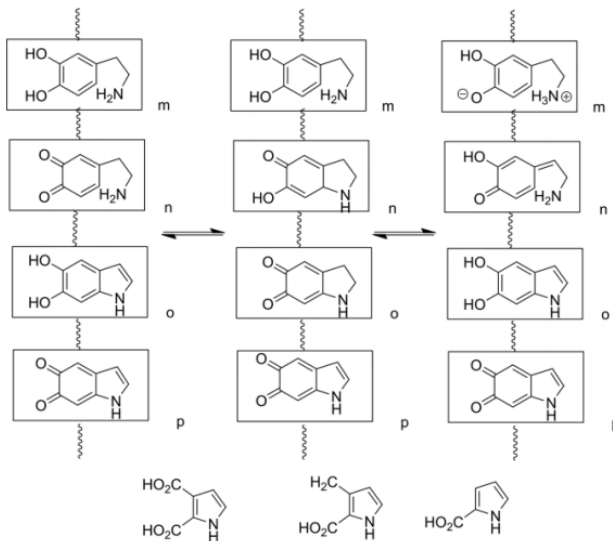
Polydopamine (PDA) adalah polimer eumelanin sintesis yang diturunkan dari dopamin. Melanin mewakili berbagai macam pigmen yang ditemukan di alam, baik dari alam (biopolimer) dan sintesis (Lyng, dkk. 2011). Polydopamine diperoleh dengan oksidasi dari dopamin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 (Liebscher, 2019).



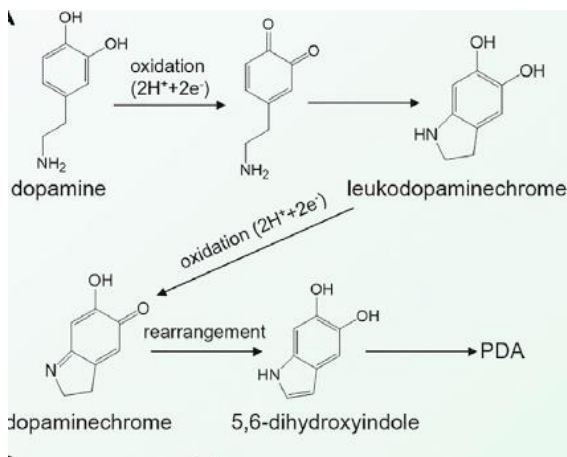
Gambar 2.14 Oksidasi dari Dopamin menjadi Polidopamin (Liebscher, 2019)

Penjelasan tentang struktur PDA masih belum mencapai akhir yang pasti dan kemungkinan besar tidak dapat ditemukan sepenuhnya karena struktur dari PDA sangat tergantung dengan proses pembuatannya selain itu sintesis dengan rasio dari dopamin dan agen oksidasi juga mempengaruhi pembentukan PDA. Beberapa penelitian menemukan bahwa PDA adalah

campuran oligomer yang berbeda dalam panjang rantai (trimer dan tetramer) dan dalam komposisi berbagai unit monomer, temuan yang sangat baru sampai pada kesimpulan bahwa lapisan PDA memiliki sifat polimerik yang dominan. Feniletilamin, indol dan indolina di berbagai tingkat oksidasi, sejauh cincin benzena, ditemukan pada struktur PDA. Selain itu, penghancuran oksidatif cincin fenil dari struktur indol dapat menghasilkan asam pirol karboksilat atau katekol yang mengandung karboksilat, namun pada tingkat yang lebih rendah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. Rasio unit yang berbeda tergantung pada mode sintesis (konsentrasi DA, zat pengoksidasi), maka dari itu jumlah unit DHI meningkat dengan penurunan konsentrasi DA (Liebscher, 2019).



Gambar 2.15 Struktur Umum PDA (atas) dan unit pirol karboksilat pada tingkat yang lebih rendah (Liebscher, 2019).



Gambar 2.16 Oksidasi dopamin menjadi DHI (Wang, dkk, 2019)

Struktur yang pasti dari PDA masih sulit untuk dipahami meskipun PDA telah banyak digunakan dalam ilmu material. Pembentukan PDA mengalami proses oksidasi dan proses 'polimerisasi' kovalen, dopamin dioksidasi menjadi 5,6-dihidroksiindol (DHI) pada tahap awal, dan perselisihan utamanya terletak pada proses 'polimerisasi' berikutnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.

Umumnya, PDA terbentuk dalam kondisi alkali yang lemah ($pH > 7,5$) yang melibatkan oksigen sebagai oksidan. Meskipun sederhana dan efektif, masih ada beberapa keterbatasan. Karena kondisi basa biasanya diperlukan untuk mewujudkan polimerisasi dopamin, hal itu tidak dapat diterapkan pada bahan yang tidak stabil dalam kondisi basa. Selain itu, pengendapan PDA adalah proses yang memakan waktu, yang membutuhkan beberapa puluh jam untuk membentuk lapisan konformal pada sebagian besar permukaan material. Maka dari itu telah dikembangkan dengan melibatkan pengenalan reagen tambahan. Reagen tambahan yang sering digunakan termasuk oksidan dan katalis. Banyak oksidan, seperti amonium persulfat, natrium periodat, dan kalium klorat,

dapat meningkatkan kinetika pengendapan melanin atau PDA dan memungkinkan polimerisasi dopamin di bawah media berair netral dan asam (Wang, dkk. 2019).

Tabel 2.3 Sifat fisikokimia dan biologi PDA (Ho dan Ding, 2014)

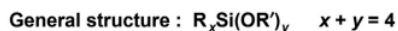
Sifat	Merit
Sudut Kontak	40-60°
Gugus Fungsi	Katekol dan Amine
Ketebalan lapisan	Tingkat nanometer
Sitotoksisitas	Rendah
Biokompatibilitas	Baik

Pelapisan dengan menggunakan PDA dikonfirmasi sebagai cara yang efisien untuk meningkatkan hidrofilitas. Hidrofilitas yang melekat pada lapisan PDA memberikan karakteristik permukaan yang diinginkan tanpa perlu modifikasi lebih lanjut. PDA mengandung sejumlah besar kelompok reaktif, seperti gugus katekol dan NH_2 , dan karenanya dapat berikatan kuat dengan ion logam melalui oksigen fenolik, selain itu PDA juga stabil di lingkungan berair. Pada permukaan material anorganik (mis., titanium) ikatan koordinasi yang kuat dan reversibel terbentuk antara katekol dan permukaan material anorganik; sebaliknya, ikatan kovalen terjadi antara kuinon dan permukaan bahan organik (permukaan yang kaya amina) (Ho dan Ding, 2014). Sifat fisikokimia dan biologi dari PDA ditunjukkan pada Tabel 2.3. Sudut kontak didapatkan dari pengujian *wettability* yaitu dengan memberikan tetesan air pada permukaan, lalu sudut dari tetesan air tersebut diukur. Gugus fungsi dapat dilihat dengan menggunakan pengujian FTIR dan XPS. Ketebalan lapisan bisa didapatkan dengan pengujian *Atomic Force Microscopy* (Lee, dkk, 2007) yaitu tip dari AFM akan berinteraksi dengan permukaan sampel, gerakan ini diukur dengan laser yang difokuskan pada tip dengan *photodiode* (Sinha Ray, 2013). Biokompatibilitas dan sitotoksisitas dapat dilakukan dengan

melihat *cell viability* dari sel kanker setelah dimasukkan ke medium dengan PDA, CPT (*camptothecin*) yaitu model obat anti kanker, dan CPT-PDA (Ho dan Ding, 2013).

2.5 Silane Coupling Agent

Promotor adhesi atau *coupling agent* adalah bahan kimia yang bekerja pada *interface* antara polimer organik dan permukaan anorganik untuk meningkatkan daya rekat di antara kedua material tersebut. Organosilane menjadi jenis bahan kimia utama yang menjadi promotor adhesi. Bahan kimia berbasis silikon yang akan berfungsi sebagai promotor adhesi atau *coupling agent* memiliki struktur umum empat substituen yang melekat pada atom silikon tunggal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. Struktur yang paling umum memiliki tiga gugus anorganik-reaktif alkoksi, metoksi atau etoksi, dan satu gugus organik. Kelompok organik dapat berupa reaktif seperti amino, epoksi, sulfido, isosianat, dan metakrilat, atau tidak reaktif seperti metil, etil, butil, oktil, dan fenil.



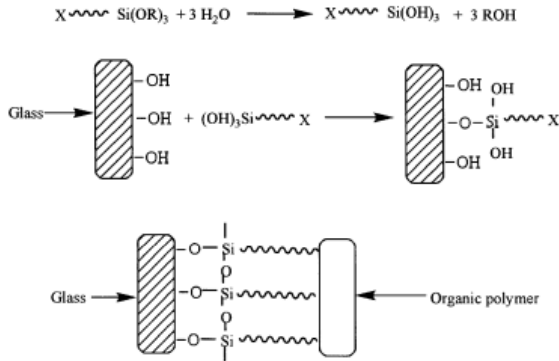
- R = alkyl, aryl, or organofunctional group
- OR' = methoxy or ethoxy

Gambar 2.17 Struktur umum dari *Silane Coupling agent* (Pape, 2017)

Silanol (-Si-OH) maupun sililamin (-Si-NH₂) tidak stabil, dan akan berkondensasi dengan cepat menjadi siloksan (-Si-O-Si-) atau silazana (-Si-NH-Si-). Klorosilan atau metoksisilan, RSiX₃, X=Cl atau CH₃O, bereaksi dengan air (terhidrolisis) untuk menghasilkan silanetriol (-Si(OH)₃) yang tidak stabil, yang pada gilirannya akan berkondensasi dengan silanetriol kedua untuk membentuk struktur siloksan (-Si-O-Si-). Sama seperti karbon, silikon akan mudah terikat pada empat substituen dalam keadaan paling stabil, tetapi silikon lebih elektropositif daripada karbon

yaitu tidak membentuk ikatan rangkap stabil, sifat elektropositif dari atom silikon tersebut yang menyebabkan atom atau kelompok tertentu yang melekat langsung pada silikon menjadi sangat reaktif dan menunjukkan inorganik dibandingkan reaktivitas organik. Sifat unik dari silane untuk memiliki reaktivitas anorganik dan organik dalam satu struktur molekul bersama dengan kimia khusus silikon memunculkan penggunaan bahan kimia silane sebagai *coupling agent* dan promotor adhesi. Mekanisme dari *silane coupling agent* dalam meningkatkan ikatan *interface* diantara dua fasa ditunjukkan pada Gambar 2.18. Untuk dapat diklasifikasikan sebagai organosilane, salah satu substituen silane harus berupa gugus organik yang secara langsung melekat pada silikon melalui ikatan Si-C. Grup *spacer* organik biasanya memisahkan kelompok organofungsional dari atom silikon. Jika gugus pengatur panjangnya setidaknya tiga karbon ($-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2-$), maka reaktivitas organik dari gugus organik dalam silane akan sama dengan reaktivitas organik dalam kimia karbon, jika gugus pengatur panjangnya satu atau dua karbon, maka atom silikon dapat mempengaruhi reaktivitas dan mengubah kimia kelompok organik.

Kelompok alkoxi pada silikon terhidrolisis menjadi silanol dengan air yang ditambahkan atau dari air residu pada permukaan anorganik. Silanol berkoordinasi dengan gugus hidroksil logam pada permukaan anorganik sehingga membentuk ikatan oksana dengan mengeliminasi air. Setelah *coupling agent* dilekatkan ke permukaan anorganik, permukaan itu mengambil sifat kimia permukaan dan karakteristik reaktivitas permukaan dari gugus organik yang melekat pada *coupling agent*. Permukaan yang di beri perlakuan akan memperlihatkan energi permukaan dari gugus organik dan permukaan dapat menjadi permukaan yang reaktif sebagaimana ditentukan oleh reaktivitas gugus organofungsional dalam *coupling agent* (Pape, 2017). Jenis-jenis *silane coupling agent* komersil ditunjukkan pada Tabel 2.4.



Gambar 2.18 Mekanisme *silane coupling agent* (Kumudinie, 2001)

Tabel 2.4 Jenis *Silane coupling agent* komersil (Pape, 2017)

Tipe Kimia	Nama Kimia	Tipe Polimer/Aplikasi
Amin	<i>Aminopropyltriethoxysilane</i>	Akrilik, nilon, epoksi, fenolik, PVC, uretan,
Diamin	<i>Diaminopropyltrimethoxysilane</i>	melamin, <i>nitrile rubber</i>
Methacrylate	3- <i>Methacryloxypropyltrimethoxysilane</i>	Akrilik, nilon, epoksi, fenolik, PVC, uretan, melamin, <i>nitrile rubber</i>
Epoksi	3- <i>Glycidoxypropyltrimethoxysilane</i>	<i>Unsaturated polyesters</i> , akrilik, EVA, poliolefin
Metil	<i>Methyltrimethoxysilane</i>	Epoksi, PBT, uretan, akrilik, <i>polysulfides</i>
Isobutil	<i>Isobutyltrimethoxysilane</i>	Agen hidrofob untuk permukaan mineral
Fenil	<i>Phenyltrimethoxysilane</i>	Agen hidrofob untuk permukaan mineral
Oktil	<i>Octyltriethoxysilane</i>	Agen hidrofob, pendispersi untuk permukaan mineral, <i>blends</i> , stabilitas termal
		Agen hidrofob untuk permukaan mineral, dispersi mineral dalam

Vinil	<i>Vinyltrimethoxysilane</i>	poliolefin Dicangkokkan ke polietilen untuk kelembaban <i>cross-linking</i> , karet EPDM, SBR, poliolefin
Chloroakyl	<i>3-Chloropropyltrimethoxysilane</i>	Uretan, epoksi, nilon, fenolik, poliolefin
Chloroakyl	<i>3-Chloropropyltriethoxysilane</i>	Uretan, epoksi, nilon, fenolik, poliolefin
Vinylbenzylamino	<i>Vinylbenzylaminotrimethoxysilane</i>	Epoksi untuk PCB, poliolefin, semua jenis polimer

Pada Tabel 2.5 ditunjukkan sifat dari beberapa jenis *silane coupling agent*. SIA0610.0 adalah kode untuk *3-aminopropyl triethoxysilane*. SIA0611.0 adalah kode untuk *3-aminopropyl trimethoxysilane*. SIA0591.0 adalah kode untuk *2-aminoethyl 3-aminopropyl trimethoxysilane*. SIG5840.0 adalah kode untuk *3-glicidoxypopyl trimethoxysilane*. Sudut kontak didapatkan dengan pengujian *wettability* dengan memberikan tetesan air pada permukaan, lalu sudut dari tetesan air tersebut diukur. *Specific gravity* bisa didapatkan dengan pengujian *density* yaitu dengan standar ASTM D792 (Shrivastiva, 2018). *Flashpoint* didapatkan dengan pengujian *flashpoint* dengan standar ASTM D93, yaitu cup dengan isi spesimen dilengkapi dengan penutup dan dipanaskan lalu diaduk pada laju yang ditentukan. Sumber pengapian diarahkan ke dalam cup secara berkala sampai *flashpoint* terdeteksi.

Tabel 2.5 Sifat dari *Silane coupling agent* (Arkles, 2014)

Sifat	SIA0610.0	SIA0611.0	SIA0591.0	SIG5840.0
Viskositas	1,6 cSt	-	6,5 cSt	3,2 cSt
Sudut kontak	59°	-	-	-
Berat molekul	221,37	179,29	222,36	236,34
Titik Didih	122°/30	80°/8	140°/15	120°/2

(°C/mm)				
Flashpoint	104°C	83°C	150°C	135°C
Specific gravity	0,951	1,027	1,019	1,070

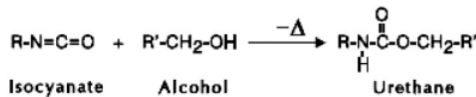
2.6 Poliuretan

Poliuretan (PU) adalah kelas polimer yang serbaguna dalam sintesis dan aplikasi. Properti superior membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi. Mereka memiliki sifat mekanik yang sangat baik dan ketahanan terhadap bahan kimia. Kehadiran fungsi reaktif dalam rantai utama poliuretan meningkatkan kompatibilitasnya dengan sebagian besar polimer sehingga cocok untuk pembentukan struktur jaringan. Poliuretan berbeda dari polimer normal karena tidak ada monomer uretan. Hubungan kimia yang ada dalam polimer dilambangkan sebagai uretan (-NHCOO-) dan merupakan bagian yang paling reaktif dalam poliuretan.

Poliuretan diperoleh dari reaksi antara diol dan diisocianat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19. Diol adalah sistem dengan dua gugus -OH dan isocianat mengandung gugus -NCO di akhir. PU dapat disintesis dalam satu langkah dengan pencampuran langsung komponen atau dalam metode prapolimer. Metode prapolimer meliputi penambahan diol dan isocianat untuk membentuk prapolimer poliuretan dengan -NCO sebagai gugus akhir. Prapolimer ini kemudian diperpanjang dengan rantai ekstender untuk membentuk poliuretan. Isocianat yang paling umum digunakan untuk sintesis poliuretan adalah *diphenylmethane diisocyanate* (MDI) atau *toluene diisocyanate* (TDI), *hexamethylene diisocyanate* (HDI) atau *isophorone diisocyanate* (IPDI). Polioliol yang digunakan untuk sintesis PU dapat berupa polieter polioliol dan poliester polioliol.

Poliuretan biasanya memiliki struktur tersegmentasi, segmen keras yang berasal dari isocianat dan segmen lunak yang berasal dari diol. Panjang dan berat molekul dari molekul monomer memiliki pengaruh langsung terhadap sifat poliuretan yang terbentuk. Monomer dengan berat molekul yang rendah

dapat menghasilkan uretan yang sangat pekat sehingga akan keras dan kaku. Di sisi lain, monomer yang berat dan panjang ketika dikombinasikan untuk membentuk PU menghasilkan jumlah segmen lunak yang tinggi, dengan meningkatnya konsentrasi segmen lunak, bahan yang dihasilkan menjadi fleksibel dan elastomer. Faktor utama yang menentukan sifat produk adalah rasio NCO-OH (Reghunadhan dan Thomas, 2017).



Gambar 2.19 Reaksi pembentukan poliuretan (Reghunadhan dan Thomas, 2017).

Produk PU dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu PU elastis, seperti elastomer, busa fleksibel, pelapis, perekat, dan serat, sedangkan *rigid* PU seperti busa kaku, busa struktural, busa pengganti kayu, dan solid polimer. Secara umum, PU adalah polimer yang memiliki kekuatan tinggi dengan sifat material yang dapat diprediksi dan dapat diukur dimana dapat disintesis dan diaplikasikan pada sebagian besar media, yang menghasilkan aplikasi yang luas dalam industri konstruksi dan infrastruktur. PU telah menjadi banyak digunakan dalam industri pelapisan karena daya rekatnya yang baik, ketahanan terhadap air dan bahan kimia, ketangguhan, *curing* yang cepat, toleransi yang besar terhadap cuaca ekstrem, dan kemampuan untuk disesuaikan dengan banyak penggunaan spesifik. Daya rekat yang baik dan sifat luar biasa lainnya memungkinkan *adhesive* PU untuk digunakan secara luas dalam beberapa aplikasi. Sebagai *adhesive*, PU dapat secara efektif membasahi permukaan banyak substrat. Viskositasnya yang rendah memungkinkannya menyebar melalui substrat berpori. Selain itu, PU membentuk ikatan hidrogen dengan beberapa substrat dan membentuk ikatan kovalen dengan substrat yang mengandung hidrogen aktif, yang juga menunjukkan

ketangguhan dan ketahanan yang baik terhadap air dan berbagai bahan kimia. Namun, resistensi yang buruk terhadap degradasi regangan mekanis dan deformasi suhu tinggi adalah kelemahan utama PU. Secara umum, degradasi termal PU dimulai setelah 200°C. Resistensi terhadap suhu tinggi yang rendah adalah salah satu penyebab utama penggunaan PU yang relatif terbatas (Somarathna, dkk, 2018), sifat mekanik dari poliuretan ditunjukkan pada Tabel 2.6. *Density* didapatkan dari pengujian *density* dengan standar ASTM D792. *Tensile strength*, *elastic modulus*, dan *elongation at break* didapatkan dari pengujian tarik. *Flexural strength* dan *flexural modulus* didapatkan dari pengujian *flexural*. *Compressive strength* didapatkan dari pengujian kompresi.

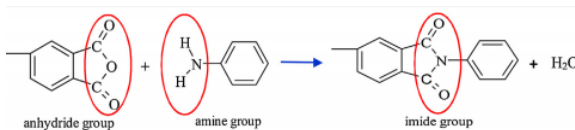
Tabel 2.6 Sifat mekanik dari poliuretan (Engineering Fundamental)

<i>Properties</i>	<i>Unit</i>	<i>Range</i>
Massa jenis	-	1,03-1,5
<i>Tensile Strength</i>	MPa	1-69
<i>Elastic Modulus</i>	MPa	69-690
<i>Compressive Strength</i>	MPa	138
<i>Flexural Strength</i>	MPa	5-31
<i>Flexural Modulus</i>	GPa	69-690
<i>Elongation at break</i>	%	100-1000

2.7 Poliimida

Poliimida adalah kelas polimer yang sangat stabil, stabilitas termal ini dikarenakan *backbone* aromatik yang kaku. Struktur kimia poliimida sendiri merupakan bidang yang luas, dan mencakup beragam monomer yang tersedia dan berbagai metodologi sintetik. Sifat-sifat polimida dapat diubah secara drastis oleh variasi kecil dalam struktur. Perubahan halus dalam struktur dianhidrida dan/atau komponen diamina akan memiliki efek signifikan pada sifat-sifat poliimida akhir. Secara umum, polimida dibuat dari dianhidrida dan diamina, seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 2.20. Metode sintesis yang paling dikembangkan untuk poliimida adalah metode dengan dua langkah. Langkah pertama melibatkan polimerisasi yang sangat cepat, eksotermik, bertahap pada suhu yang relatif rendah untuk membentuk *poly(amic acid)* dari dianhidrida dan diamina. Selanjutnya, *poly(amic acid)* diubah menjadi polimida yang sesuai melalui siklisasi intramolekul (imidisasi) yang melepaskan kondensat air. Untuk imidisasi nya terdapat dua metode yaitu secara kimia dan termal. Secara umum, poliimida yang berasal dari imidisasi kimia lebih mudah larut daripada yang dari imidisasi termal. Namun, sifat termal poliimida dari imidisasi termal, termasuk Tg dan suhu dekomposisi, lebih unggul daripada poliimida dari siklisasi kimia.

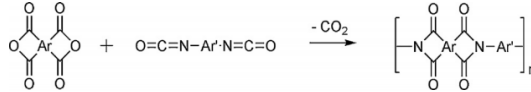


Gambar 2.20 Reaksi antara kelompok amina dan anhidrida untuk membentuk kelompok imida (Sanaeepur, dkk, 2019)

Selain di sintesis menggunakan dianhidrida dan diamina, poliimida dapat di sintesis dengan beberapa reaksi lainnya yaitu

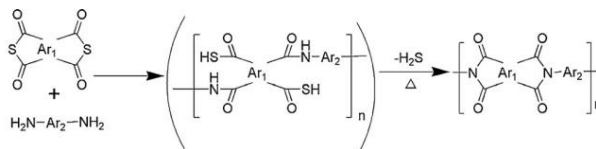
- Dianhidrida dan diisosianat. Polimerisasi melibatkan hidrolisis diisosianat untuk membentuk diamina dan kemudian *poly(amic acid)*, yang kemudian dikonversi menjadi polimida dengan metode imidisasi umum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.21. Rute ini menguntungkan karena reaksi ini kurang sensitif terhadap kelembaban dan diisosianat umumnya lebih larut dalam pelarut organik daripada diamina. Salah satu kelemahan dari metode ini adalah bahwa hanya ada beberapa diisosianat yang dapat dipilih, dibandingkan dengan banyak diamina yang tersedia dari sumber sintetik atau komersial. Namun, reaksi cepat antara diisosianat dan asam

tetrakarboxilat membuat rute ini layak sebagai preparasi dari poliimida.



Gambar 2.21 Sintesis poliimida dari dianhidrida dan diisocianat (Liauw, dkk, 2012)

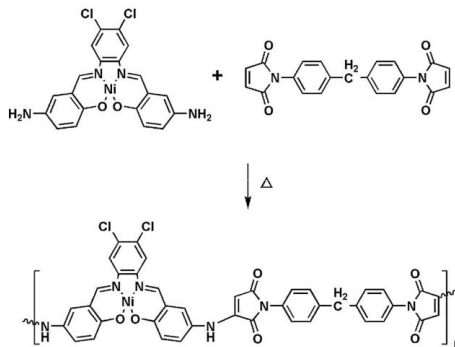
- Diamina dan *dithioanhydrides*. *Dithioanhydrides* dapat dibuat dengan mereaksikan asam tetrakarboxilat aromatik yang sesuai dengan natrium sulfida. Poliimida kemudian diperoleh setelah menghilangkan hidrogen sulfida dengan pemanasan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Sintesis poliimida dari diamina dan *dithioanhydrides* (Liauw, dkk, 2012)

- Diamina dan *bis(maleimides)* (reaksi tambahan Michael). Pada metode sintesis ini, cincin imida dari poliimida tidak terbentuk selama polimerisasi tetapi timbul dari struktur maleimida, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.
- *Bisdiene* dan *bidienophiles* (reaksi Diels–Alder). Reaksi Diels-Alder adalah reaksi *cycloaddition* yang digerakkan secara termal antara dienofil dan 1,3-diena terkonjugasi. Dalam reaksi ini, dienofil ditambahkan ke diena terkonjugasi untuk menghasilkan produk siklik yang disebut *adduct*. Cincin furan adalah salah satu diena heterosiklik paling penting yang digunakan dalam reaksi Diels-Alder

- Sililasi amina dan dianhidrida. Penggunaan amina sililasi memiliki beberapa kelemahan, seperti kebutuhan untuk mensintesis dan memurnikan monomer teraktivasi yang sulit untuk diisolasi karena kepekaannya terhadap kelembaban. Amina sililasi juga lebih mahal dari pada diamina.
- Senyawa di(hidroksialkil) dan senyawa diimida (reaksi Mitsunobu). Reaksi senyawa diimida dan di(hidroksialkil) di bawah kondisi Mitsunobu memunculkan pembentukan langsung poliimida dalam satu langkah tunggal.



Gambar 2.23 Sintesis poliimida dari diamina dan *bis(maleimides)* (Liauw, dkk, 2012)

Sifat mekanik poliimida dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti struktur kimia, viskositas, berat molekul, prosedur persiapan, riwayat pemanasan, persiapan sampel dan metode penentuan properti. Sifat mekanik poliimida ditunjukkan pada Tabel 2.7, *tensile strength*, *modulus*, dan *elongation at break* didapatkan dari pengujian tarik. Poliimida yang mengandung unit ikatan fleksibel, seperti ikatan eter dan isopropilidena, dalam rantai utama menunjukkan *elongation* yang lebih banyak. Selain itu, poliimida noncoplanar, asimetris dan amorf juga biasanya menunjukkan *elongation* yang lebih tinggi. Terdapat aturan

umum tetapi tidak mutlak yaitu polimer dengan modulus mekanik tinggi menunjukkan *elongation* yang lebih rendah.

Analisis *Thermogravimetric* mengungkapkan stabilitas termal yang baik untuk poliimida aromatik. Poliimida yang mengandung unit heteroaromatik, unit aromatik noncoplanar atau kaku menunjukkan resistensi panas tinggi dan suhu transisi gelas tinggi. Namun, poliimida yang mengandung ikatan fleksibel, seperti unit eter, menunjukkan temperatur transisi gelas yang lebih rendah karena *backbone* polimernya yang relatif fleksibel. Cincin piridin meningkatkan simetri dan aromatisitas polimer dan meningkatkan stabilitas termal dan kimia. Selain itu, cincin piridin membantu polimer mempertahankan sifat mekanisnya pada suhu tinggi. Polimida aromatik memiliki stabilitas termal yang sangat baik dan sifat mekanik yang baik, dan telah banyak digunakan dalam *photoresists*, penyalarsan kristal cair, membran pemisahan gas, komposit, film LB, aplikasi pencampuran, pengendapan fase uap, perangkat *electroluminescent*, *polyelectrolytes*, sel bahan bakar, bahan elektrokromik, bahan nano, dan bahan memori polimer (Liauw, dkk, 2012).

Tabel 2.7 Sifat mekanik poliimida (Liauw, dkk, 2012)

Sifat	Nilai
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	70-100
<i>Tensile Modulus</i> (GPa)	1,5-3,0
<i>Elongation at break</i> (%)	2-15
Stabilitas termal (°C)	440

2.8 Adhesi pada *Interface*

Adhesi adalah kecenderungan partikel dan/atau permukaan yang berbeda untuk melekat atau mengikat satu sama lain, tipe dasar dari adhesi ditunjukkan pada Tabel 2.8. Kekuatan adhesi antara dua material tergantung pada interaksi antara dua material tersebut dan area permukaan dimana kedua material berada dalam kontak (Fraunhover, 2012).

Tabel 2.8 Tipe dasar dari adhesi (Fraunhofer, 2012).

Tipe	Karakteristik
Spesifik	Interaksi antar molekul pada permukaan yang mengalami kontak
Mekanik	Adhesi yang timbul akibat <i>interlocking</i> mekanik antara perekat dan permukaan substrat
Efektif	Ikatan optimal antara perekat dan permukaan substrat karena efek gabungan dari adhesi spesifik dan mekanik

Faktor yang mempengaruhi adhesi yaitu *wettability*, kemampuan cairan untuk menyebar pada permukaan yang padat. Keterbasahan padatan yang diberikan oleh cairan dapat diukur dengan mempertimbangkan keseimbangan gaya dalam suatu sistem yang terdiri dari setetes cairan yang menempel pada permukaan padat bidang di atmosfer yang sesuai. Sudut kontak (θ) cairan pada serat permukaan padat adalah parameter utama dan penting untuk mengetahui karakterisasi keterbasahan material. Umumnya, sudut kontak diukur dengan memberi setetes cairan ke permukaan rata dari substrat padat, lalu sudut kontak diperoleh dari garis singgung sepanjang tiga *interfaces*: padat/cair, cair/uap, dan padat/uap, setelah itu sudut kontak dapat diukur secara langsung dengan goniometer atau dihitung dengan menggunakan hubungan trigonometri sederhana yang melibatkan dimensi tetesan cairan. Secara teori, sudut kontak dari kemampuan *wettability* dapat dihitung dengan persamaan Young yang ditunjukkan pada Persamaan 2.7

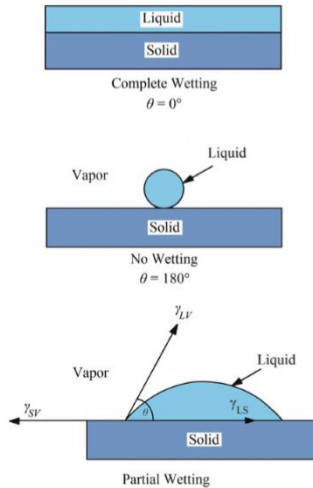
$$\gamma_{sv} = \gamma_{ls} + \gamma_{lv} \cdot \cos \theta \quad (2.7)$$

Dimana γ adalah energi permukaan spesifik, dan sv, ls, dan lv adalah *solid/vapor*, *liquid/solid*, dan *liquid/vapor*. Sudut kontak yang semakin kecil menandakan kemampuan *wettability* yang semakin baik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.24. Menurut Licari dan Swanson (2011) *wetting* yang baik jika sudut

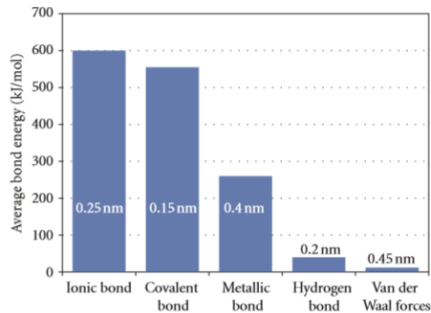
kontak dibawah 90° dan *wetting* dikatakan buruk ketika sudut kontak di atas 90° .

Penting untuk disadari bahwa *wettability* dan ikatan bukanlah istilah yang identik. *Wettability* menggambarkan tingkat kontak intim antara cairan dan padatan yang tidak selalu berarti ikatan yang kuat pada *interface*. Material dapat memiliki *wettability* yang sangat baik dan ikatan lemah tipe Van der Waals dengan energi rendah. Sudut kontak yang rendah, yang berarti *wettability* yang baik, adalah kondisi yang diperlukan tetapi tidak memadai untuk ikatan yang kuat. *Wettability* sangat penting dalam PMC karena dalam pembuatan PMC matriks cairan harus menembus dan membasahi serat. Di antara resin polimer yang biasa digunakan sebagai bahan matriks, resin termoset memiliki viskositas dalam kisaran 1–10 Pas. Viskositas leleh dari termoplastik adalah dua sampai tiga orde besarnya lebih tinggi daripada termoset dan menunjukkan karakteristik *wettability* serat yang lebih buruk. Meskipun sudut kontak adalah ukuran *wettability*, ada banyak faktor lain yang harus diperhatikan seperti waktu dan suhu kontak, reaksi *interface*, stoikiometri, kekasaran permukaan dan geometri, formasi panas, dan konfigurasi elektronik (Chawla, 2012).

Chemical bonding adalah faktor selanjutnya dari adhesi, ikatan terbentuk antara kelompok kimia pada permukaan serat dan kelompok kimia lain yang kompatibel dalam matriks (Kim, dkk. 1998), ikatan ionik atau kovalen yang terbentuk menghasilkan ikatan kuat antara kedua material tersebut. Ikatan yang lebih lemah terbentuk ketika ada ikatan hidrogen. Jadi, ketika atom permukaan perekat dan substrat membentuk ion, ikatan kovalen, atau hidrogen, adhesi kimia terjadi. Ikatan memiliki ukuran yang pendek seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.25 sehingga untuk menghasilkan ikatan yang stabil, permukaan dengan potensi ikatan kimia harus sangat berdekatan (Fraunhofer, 2012).



Gambar 2.24 Kondisi *wettability* yang berbeda (Chawla, 2012)



Gambar 2.25 Energi ikatan dan panjang ikatan dari gaya adhesi (Fraunhofer, 2012).

Ikatan antara dua permukaan juga dapat dibentuk oleh interdifusi atom atau molekul di seluruh *interface*. Ciri mendasar dari mekanisme interdifusi adalah harus ada keseimbangan termodinamika antara kedua konstituen. Kekuatan ikatan dalam komposit matriks polimer akan tergantung pada jumlah

keterikatan molekul, jumlah molekul yang terlibat dan kekuatan ikatan antara molekul. Interdiffusion dapat dipromosikan oleh adanya pelarut dan jumlah difusi akan tergantung pada konformasi molekuler, konstituen yang terlibat, dan kemudahan pergerakan molekul (Kim, dkk. 1998). Faktor lain dari adhesi yaitu *mechanical bonding*, namun energi ikatan nya lebih rendah dibandingkan dengan *chemical bonding*. *Mechanical bonding* saja tidak cukup dalam banyak kasus. Namun, *mechanical bonding* dapat menambahkan kekuatan adhesi dengan adanya ikatan reaksi, ke ikatan keseluruhan. Selain itu, *mechanical bonding* efisien dalam transfer beban ketika gaya yang diterapkan sejajar dengan *interface*. Dalam kasus *mechanical bonding*, matriks harus mengisi seluruh permukaan serat. Kekasaran permukaan, dapat berkontribusi pada kekuatan ikatan hanya jika matriks cair dapat membasahi permukaan serat (Chawla, 2012).

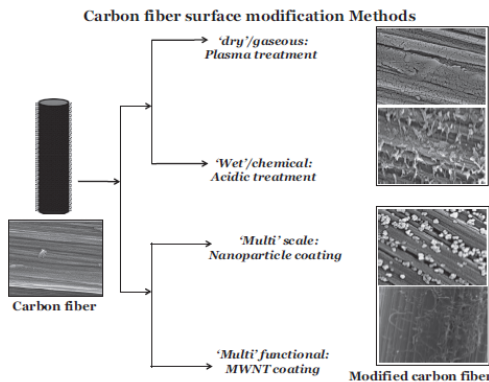
2.9 *Wet Chemical Treatment*

Kualitas serat karbon dicapai dengan grafitisasi dan proses ini dilakukan pada berbagai suhu tergantung pada persyaratan akhir. Serat karbon murni masih sangat *inert*. Meskipun kekuatan dan modulus meningkat dengan meningkatnya suhu grafitisasi, reaktivitas permukaan menurun. Untuk meningkatkan reaktivitas / ikatan, permukaan serat diberi *treatment*. Perlakuan pada permukaan dilakukan untuk menjaga kompatibilitasnya dengan matriks. Perlakuan pada permukaan serat umumnya berbeda untuk sistem matriks yang berbeda. Perbedaan ini dipertahankan untuk memiliki kompatibilitas yang tepat dengan fase matriks sehingga kekuatan *interface* maksimum dapat dicapai. Kelompok fungsional yang umumnya dimanfaatkan pada permukaan serat karbon adalah $-CO$, $-OH$, $-COH$ dan $-COOH$. Kelompok polar fungsional ini mengikat serat dan matriks melalui van der Waals dan/atau ikatan hidrogen (Kundan KV, dkk, 2017). Sharma, dkk (2014) mengategorikan *surface treatment* menjadi tiga kategori utama, yaitu '*wet*' *chemical*, '*dry*', dan '*multiscale*'/'*multi-*

fungsi untuk meningkatkan adhesi *interface* serat dan kekuatannya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.26.

Untuk metode '*wet*' *chemical* sendiri terdiri dari *sizing*, *acidic treatment*, modifikasi dengan *electrochemical*, dan *electropolymer* (Sharma, dkk, 2014). Verdnam dan Sharma (2019) juga mengklasifikasikan metode modifikasi pada permukaan serat karbon seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.27, dimana sebagian besar metode *surface treatment* yang dinyatakan pada metode *dry* dan *wet* telah mencakup banyak metode *treatment* yang disebutkan dalam metode oksidatif dan non oksidatif.

Acidic treatment adalah perlakuan dengan asam kuat dengan mendegradasi permukaan dan/atau memperkenalkan perforasi pada serat karbon untuk meningkatkan *interlocking* antara serat dan matriks, secara bersamaan menginduksi lubang, celah, celah mikro, dan *flaw* pada permukaan serat yang akan mengurangi kekuatan serat tunggal. Asam yang biasa digunakan pada metode *treatment* ini yaitu asam nitrat (HNO_3), *maleic anhydrides*, *sodium hydroxide* (NaOH), *acrylic acid*, *hydrochloric acid*, dan masih banyak lainnya.



Gambar 2.26 Metode modifikasi pada serat karbon (Sharma, dkk, 2014)

Surface modification methods of carbon fiber				
Wet Methods	Dry Methods	Using Nano species	Oxidative Methods	Non oxidative methods
Sizing	Plasma surface modification	Carbon nano-tubes	Liquid Phase Oxidation Electrochemical (HNO ₃ , NaOH) Chemical (HNO ₃ , H ₂ O ₂ , KMnO ₄ etc)	Whiskerization
Acidic modification	High energy irradiation modification	ZnO nano-rods	Plasma Oxidation (O ₂ , N ₂ , NH ₃ etc)	Plasma
Electrochemical modification	Nickel surface coating	Silicon dioxide (SiO ₂) nano-tubes		Plasma Polymerization
Electro-polymer coating	Thermal modifications	Titanium dioxide (TiO ₂) nano rods	Gaseous Oxidation Oxidation in air Oxidation in O ₂ and O ₃ Containing gases Catalytic Oxidation	Pyrolytic Carbon deposition
Miscellaneous Methods	Miscellaneous	Graphene oxide		Miscellaneous Methods
		SiC nano wires	Miscellaneous	
		Halloysite nano tubes		
		Miscellaneous		

Gambar 2.27 Metode modifikasi pada serat karbon (Verdtnam dan Sharma, 2019)

Modifikasi dengan *electrochemical* terjadi karena transfer elektron untuk mengubah keadaan oksidasi. Oksidasi elektrokimia umumnya digunakan untuk memfungsikan permukaan. Fungsionalitas meningkatkan energi permukaan, kekasaran serat karbon dan secara signifikan meningkatkan adhesi dengan polimer matriks. Untuk meningkatkan ikatan *interface*, jenis elektrolit, konsentrasi, waktu dan kondisi *treatment* adalah parameter yang penting. Berbagai elektrolit digunakan, seperti natrium hidroksida, amonium hidrogen karbonat, amonium karbonat, asam sulfat, dan asam nitrat, untuk membuat gugus fungsi spesifik atau membuat alur dalam pada permukaan serat karbon. *Treatment* ini juga menghilangkan lapisan batas yang lemah dari permukaan serat karbon dan mempengaruhi reaktivitas dengan pembentukan gugus asam dan basa. Adsorpsi elektrolit meningkatkan aktivitas permukaan dengan menghasilkan area permukaan yang luas melalui pembentukan pori-pori ultra-mikro, dan/atau dengan memperkenalkan kelompok yang mengandung oksigen polar pada permukaan berpori serat karbon.

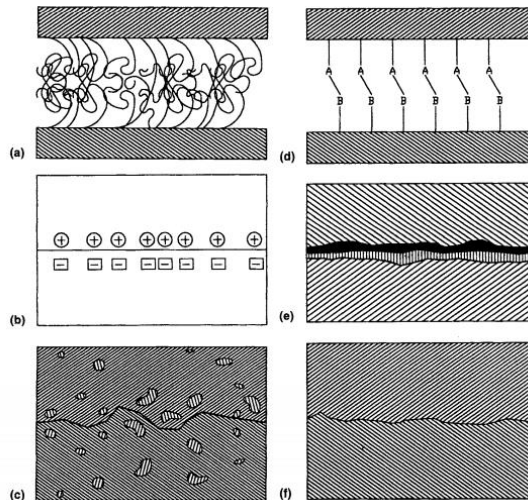
Metode elektrokimia memiliki kendala yaitu terjadi pengurangan pada kekuatan serat. Reaksi *grafting* kimia in situ, polikondensasi *interface*, polimerisasi plasma adalah teknik potensial lain yang digunakan untuk mendepositkan lapisan polimer pada permukaan serat karbon. Polimerisasi elektrokimia memiliki keunggulan dibandingkan teknik-teknik lain dengan kondisi yang terkontrol lebih tinggi, ketebalan lapisan, dan homogenitasnya (Sharma, dkk, 2014).

2.10 *Sizing Treatment*

Dalam komposit yang diperkuat serat, setiap kontraksi matriks ke serat pusat akan menghasilkan cengkeraman serat oleh matriks (Chawla, 2012), sifat ikatan antara serat dan matriks tidak hanya tergantung pada susunan atom, konformasi molekul dan konstitusi kimia serat dan matriks, tetapi juga pada sifat morfologis serat dan difusivitas unsur-unsur dalam setiap konstituen.. Adhesi pada umumnya dapat dikaitkan dengan mekanisme adsorpsi dan *wetting*, daya tarik elektrostatis, ikatan kimia, ikatan reaksi, dan ikatan reaksi pertukaran (Kim, dkk. 1998) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.28. Serat karbon memiliki permukaan yang inert karena adanya langkah karbonisasi atau grafitisasi suhu tinggi selama proses produksi, lipofobisitas permukaan, dan kehalusan yang berlebihan dan karakteristik adsorpsi serat karbon yang kurang menyebabkan ikatan yang lebih lemah dengan matriks. Maka dari itu modifikasi pada permukaan serat diperlukan untuk melakukan pelekatan *interface* serat dan matriks yang kuat untuk transfer tegangan yang efektif pada *interface* (Sharma, dkk, 2014).

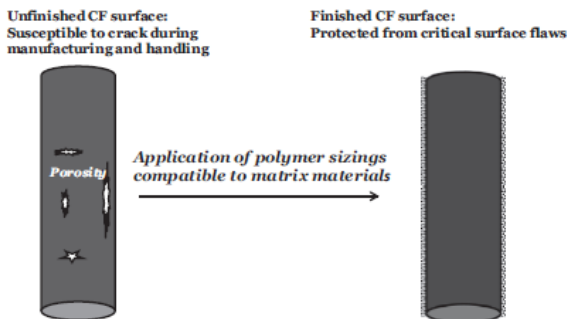
Perlakuan permukaan diklasifikasikan dalam dua kategori yaitu dengan meningkatkan daya rekat dengan cara fisik sehingga meningkatkan kekasaran yang menghasilkan lebih banyak luas permukaan dan sejumlah besar titik kontak, pori yang berukuran mikro pada permukaan serat karbon yang sudah berpori dan kategori selanjutnya yaitu melibatkan reaksi kimia yaitu dengan memasukkan kelompok fungsional reaktif yang dapat

meningkatkan ikatan kimia yang baik dengan matriks polimer. Banyak metode *surface treatment* yang dilakukan untuk meningkatkan adhesi antara serat dan matriks yaitu dengan meningkatkan *wettability* permukaan serat, dengan menghilangkan lapisan batas yang lemah, dengan pelapisan serat menggunakan matriks agar molekul matriks secara fisik masuk dan berdifusi, dengan meningkatkan *interlocking* mekanik antara serat dan matriks dengan membuat kekasaran permukaan pada serat, dengan meningkatkan, dengan meningkatkan lapisan aktif pada permukaan serat untuk menghasilkan reaksi kimia dengan bagian yang tidak beraksi dengan matriks, dan dengan melapisi *coupling agent* yang secara kimiawi mengikat serat dan matriks (Tiwari dan Bijwe, 2014).



Gambar 2.28 Ikatan pada *interface* dengan a) ikatan molekul, b) daya tarik elektrostatis, c) interdifusi unsur, d) reaksi kimia, e) reaksi kimia dengan membentuk unsur baru, f) *interlocking* mekanik (Kim, dkk. 1998).

Serat karbon yang akan digunakan untuk pembuatan komposit polimer biasanya akan diberi perlakuan pada permukaannya, selama tahap produksinya. Jenis pelapisan ini biasanya disebut sebagai *sizing*. *Sizing* adalah metode untuk melindungi filamen, yang mengalami berbagai kontak selama proses produksi komposit karena cacat atau takikan pada permukaan serat yang dibuat selama proses produksi akan bertindak sebagai konsentrator tegangan untuk perambatan retak, yang mengarah pada fraktur serat dan akhirnya kegagalan komposit yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.29. Selain untuk melindungi permukaan serat, metode *sizing* juga dapat digunakan untuk menghilangkan lapisan luar yang lemah dan memperkenalkan kelompok fungsional yang mengandung oksigen untuk adhesi yang lebih baik dimana sangat krusial untuk menghasilkan *interface* yang baik (Karger-Kocsis, Mahmood, dan Pegoretti, 2019; Sharma, dkk, 2014).



Gambar 2.29 Skema metode *sizing* dalam melindungi serat karbon (Sharma, dkk. 2014).

Kompatibilitas serat/*sizing* merupakan faktor penentu untuk kuantifikasi akhir adhesi *interface* serat dan matriks. Namun, kadang-kadang difusi material *sizing* ke dalam matriks polimer dapat menghasilkan kekuatan *interface* yang kurang mempengaruhi atau juga bisa meningkatkan *interface*. Secara

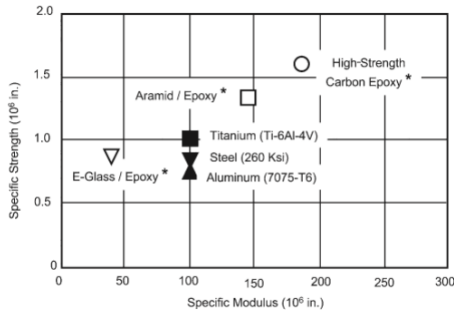
sporadis, gugus fungsi material *sizing* secara istimewa diadsorpsi ke permukaan serat dan menghambat pembubarannya dalam matriks polimer selama pembuatan komposit dan menghasilkan *interface* serat dan matriks yang lemah, maka dari itu pemilihan dari material *sizing* sangat mempengaruhi adhesi *interface* dari suatu komposit (Sharma, dkk. 2014).

2.11 Aplikasi Komposit Epoksi/Serat Karbon

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) adalah bahan komposit struktural yang sangat baik, yang memiliki dua komponen utama yaitu serat karbon kekuatan tinggi dan bahan matriks yang fleksibel dan tangguh. Biaya pembuatan serat karbon dan komposit serat karbon sangat tinggi, namun banyak digunakan dalam industri *hightech*, di mana rasio *strength-to-weight* yang tinggi (kekuatan spesifik) dan kekakuan merupakan persyaratan penting. Hal ini terutama berlaku untuk bidang dan produk seperti mobil, *aerospace*, industri kelautan dan teknik sipil, turbin angin, peralatan olahraga, dan robotika (Geier, Davim, dan Szalay, 2019).

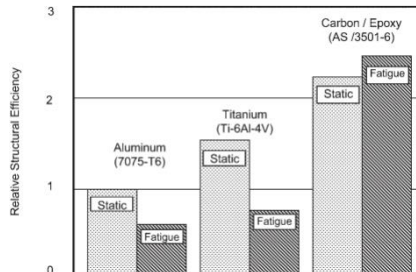
Ada banyak kelebihan dari komposit, termasuk ringan, kemampuan untuk menyesuaikan lay-up untuk kekuatan dan kekakuan optimal, meningkatkan umur *fatigue*, dan ketahanan korosi. Kekuatan spesifik (kekuatan/*density*) dan modulus spesifik (modulus /*density*) serat karbon berkekuatan tinggi lebih tinggi dibandingkan dengan paduan logam *aerospace*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.30, yang nantinya akan menguntungkan karena penghematan berat yang lebih besar yang menghasilkan kinerja yang lebih baik, muatan yang lebih besar, dapat mencapai jarak yang lebih jauh, dan penghematan bahan bakar. Selain itu korosi pada paduan aluminium dan perawatan yang konstan memakan banyak biaya untuk pesawat komersial dan militer. Ketahanan korosi komposit dapat menghasilkan penghematan besar. Pada Gambar 2.31 menunjukkan perbandingan efisiensi struktural keseluruhan komposit

epoksi/serat karbon, titanium (Ti-6Al-4V), dan aluminium 7075-T6.



*[±45°, 0° 90°]_{ls}

Gambar 2.30 Perbandingan kekuatan dan modulus spesifik komposit dengan beberapa logam *aerospace* (Campbell, 2010)



Gambar 2.31 Efisiensi struktural relatif dari bahan *aerospace* (Campbell, 2010)

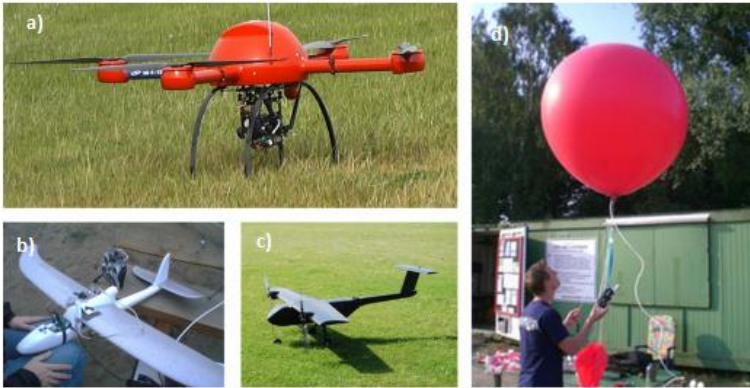
Secara umum CFRP digunakan di mana dibutuhkan kekuatan dan kekakuan yang tinggi bersama dengan bobot yang ringan. Aplikasi pesawat militer merupakan aplikasi yang pertama kali menggunakan komposit serat karbon, mendorong perkembangan banyak teknologi yang sekarang digunakan oleh industri lain. Baik pesawat komersial kecil dan besar bergantung pada komposit untuk mengurangi berat dan meningkatkan kinerja bahan bakar, contoh yang paling mencolok adalah 50 persen

badan pesawat komposit untuk Boeing 787. Selain itu komposit epoksi/serat karbon juga digunakan pada roket dan struktur satelit yang membutuhkan material kuat dan ringan. Untuk mobil balap Formula 1 berkinerja tinggi, di mana biaya bukan suatu halangan, sebagian besar *chassis*, termasuk *monocoque*, suspensi, sayap, dan penutup mesin, dibuat dari komposit serat karbon. Tongkat untuk bermain golf juga merupakan salah satu aplikasi dari komposit epoksi/serat karbon (Campbell, 2010). Selain itu komposit serat karbon juga digunakan pada *Unmanned Aerial Vehicle* yaitu pesawat yang tidak membutuhkan pilot di atas pesawat dan dapat dikendalikan secara mandiri atau dengan kendali pilot jarak jauh (Singhal, dkk. 2018) dimana sayap merupakan salah satu komponen dari UAV yang membutuhkan kekuatan tinggi tetapi ringan untuk mempertimbangkan dinamik aerodinamis, ada beberapa macam sayap yang digunakan UAV yaitu *multicopter*, *fixed wing*, *tilt-wing*, *ballon*, dan *air ship* (Yoon, dkk. 2018) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.32. Aroujo, dkk (2018) membandingkan pemakaian komposit serat karbon (CFRP), komposit serat gelas (GFRP), komposit serat kevlar (KFRP), dan aluminium 7075-T7451. Parameter memilih bahan untuk efisiensi struktural yang tinggi adalah rasio antara kekuatan dan *density*. Sesuai dengan yang ditunjukkan pada Tabel 2.8, CFRP memiliki rasio terbesar yang cocok digunakan sebagai material untuk sayap UAV (Aroujo, dkk. 2018).

Tabel 2.9 Sifat mekanik material UAV (Aroujo, dkk. 2018)

	Simbol	Unit	CFRP	GFRP	KFRP	7075-T7451
<i>UTS 0°/90°</i>	X_t/Y_t	MPa	600	440	480	524
<i>Ult. Comp.</i>	X_c/Y_c	MPa	570	425	190	524
<i>Strength 0°/90°</i>						
<i>Young's</i>	E_1/E_2	Gpa	70	25	30	71,7
<i>Modulus 0°/90°</i>						
<i>Ult. In-Plane</i>	S	MPa	90	40	50	303
<i>Shear Strength</i>						
<i>In-Plane Shear</i>	G_{12}	Gpa	5	4	5	26,9
<i>Modulus</i>						

<i>Major Poisson's Ratio</i>	ν_{12}	-	0,10	0,20	0,20	0,33
<i>Density</i>	P	Kg/m ³	1600	1900	1400	2830
<i>Comp.</i>	R	MNm/kg	0,356	0,224	0,136	0,185
<i>Strength/Density</i>						



Gambar 2.32 Beberapa jenis UAV berdasarkan sayapnya, a) *quadcopter* b) *tilt-wing* c) *fixed wing* dan d) sayap balon (Yoon, dkk. 2018)

Selain aplikasi pada *aerospace*, komposit serat karbon juga digunakan pada industri maritim, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.33. Komposit sering digunakan pada aplikasi maritim terutama CFRP dan GFRP karena daya tahannya yang meningkat di bawah air laut (Gnabelbabu, dkk, 2018). Selain itu, kekuatan spesifik yang dimiliki CFRP yang sangat unggul dalam penggunaannya pada industri maritim. Kapal dapat mengapung di laut karena *density* nya yang lebih rendah dibandingkan *density* dari air laut. Dengan massa jenis badan kapal yang lebih kecil daripada massa jenis air itu, akan diperoleh berat kapal (W) lebih kecil daripada gaya ke atas (F_A) dari air sehingga kapal laut dapat tetap terapung di permukaan air (Indah, Suparmi, dan Widha, 2017). PT Biro Klasifikasi Indonesia adalah badan klasifikasi nasional untuk mengklasifikasikan kapal niaga berbendera

Indonesia. Kegiatan klasifikasi tersebut memiliki tujuan untuk memberikan penilaian atas kelayakan kapal untuk berlayar. Pada peraturan klasifikasi dan konstruksi yaitu volum XIV peraturan untuk material non logam pada kapal *seagoing*. Nilai minimal dari sifat mekanik komposit yang ditentukan BKI dengan minimal konten volum dari resin 35% dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Nilai minimal komposit (BKI, 2014)

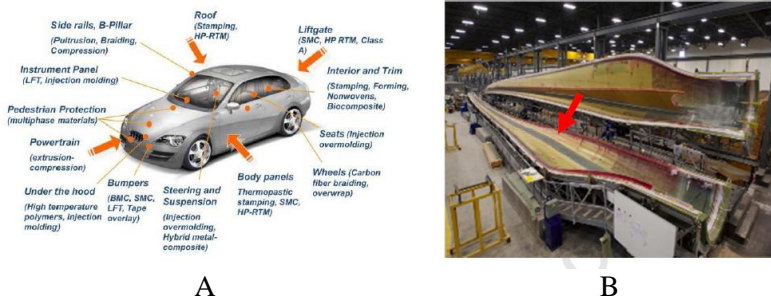
Sifat Mekanik	GFRP	CFRP
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	500	900
Modulus Young (MPa)	26000	80000
<i>Bending Strength</i> (MPa)	650	725
<i>Compressive Strength</i> (MPa)	-	600
Modulus Elastisitas		
Kompresi (MPa)	-	70000



Gambar 2.33 Contoh kapal *sea-going* (Job, 2015)

Keunggulan CFRP terkait dengan pengurangan berat badan, kekakuan dan kekuatan tinggi, daya tahan, dan dapat di daur ulang juga sangat diminati untuk aplikasi otomotif dan energi angin. Namun, tingginya biaya serat karbon menjadi faktor pembatas dalam pengembangan CFRP dalam aplikasi non-*aerospace*. CFRP telah digunakan pada kendaraan berkinerja tinggi karena penyerapan energi dampak spesifik yang baik dan ringan, kekuatan dan kekakuan spesifik yang tinggi, ekspansi

termal rendah, dan daya tahan di lingkungan yang keras. Sebagian besar aplikasi otomotif seperti panel bodi, lantai, atap, dan struktur bagian bawah bodi membutuhkan kekakuan yang baik, serat karbon dapat memberikan manfaat yang signifikan (Hiremath, dkk, 2020), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.34.



Gambar 2.34 Aplikasi CFRP pada a) otomotif b) *blade* turbin angin (Hiremath, dkk, 2020)

Di sektor energi angin, serat karbon memberikan atribut kekakuan tinggi untuk komponen seperti penutup spar *blade* turbin untuk mengurangi *bending* defleksi dari *blade* (Hiremath, dkk, 2020) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.34 dan Gambar 2.35. CFRP menawarkan kekakuan terbesar dan rasio kekuatan terhadap berat. Manfaat ini meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran *blade*. Penggunaan serat karbon dalam *blade* turbin 60 m diperkirakan mengurangi massa *blade* total sebesar 38% dan menurunkan biaya sebesar 14% dibandingkan dengan 100% *fiber glass* (Willet, 2012). Untuk sifat mekanik yang dibutuhkan dari aplikasi otomotif dengan menggunakan metode *compression molding* ditunjukkan pada Tabel 2.11. Untuk sifat mekanik yang dibutuhkan dari aplikasi *wind turbine blade* dengan menggunakan metode *vacuum assisted resin infused* ditunjukkan pada Tabel 2.12.

Tabel 2.11 Sifat mekanik CFRP untuk aplikasi otomotif
(Hiremath, dkk, 2020)

	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Tensile Modulus</i> (GPa)	<i>Flexural Strength</i> (MPa)	<i>Flexural Modulus</i> (GPa)	ILSS (MPa)
0°	1007	77	790	69	
45°	166	18	348	24	52
90°	865	79	690	46	

Tabel 2.12 Sifat mekanik CFRP untuk aplikasi *wind turbine blade* (Hiremath, dkk, 2020)

	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Tensile Modulus</i> (GPa)	<i>Flexural Strength</i> (MPa)	<i>Flexural Modulus</i> (GPa)	ILSS (MPa)
0°	806	56	724	46	
45°	148	12	332	11	47
90°	646	49	639	31	



Gambar 2.35 Turbin angin (Willet, 2012)

2.12 Manufaktur Komposit

Ada banyak metode dalam pembuatan komposit, beberapa metode tersebut yaitu

1. *Hand lay-up* adalah metode yang paling sederhana dan tertua. Pada umumnya proses menggunakan metode *hand lay-up* di bagi menjadi empat langkah, diawali dengan preparasi cetakan, pelapisan cetakan, *lay-up*, dan *curing*, yaitu proses mengeringkan komposit (Jamir, dkk. 2018).

2. *Pultrusion* yaitu metode pembuatan komposit dengan memasukkan serat ke dalam rendaman matriks resin diikuti dengan

memasukan ke dalam cetakan yang dipanaskan sebelumnya atau satu set cetakan untuk proses *curing* (Adrian dan Gheorghe, 2010)

3. Prepreg yaitu metode pembuatan komposit dimana serat nantinya akan di apit dan di tekan di antara *release paper* yang telah dilapisi dengan lapisan tipis dari larutan resin yang dipanaskan dengan viskositas yang relatif rendah sehingga dapat memberikan impregnasi menyeluruh dari serat-serat tersebut dan *carrier paper* menggunakan rol yang panas. Produk prepreg akhir yaitu *tape* tipis yang terdiri dari serat kontinu dengan resin yang *curing* sebagian.

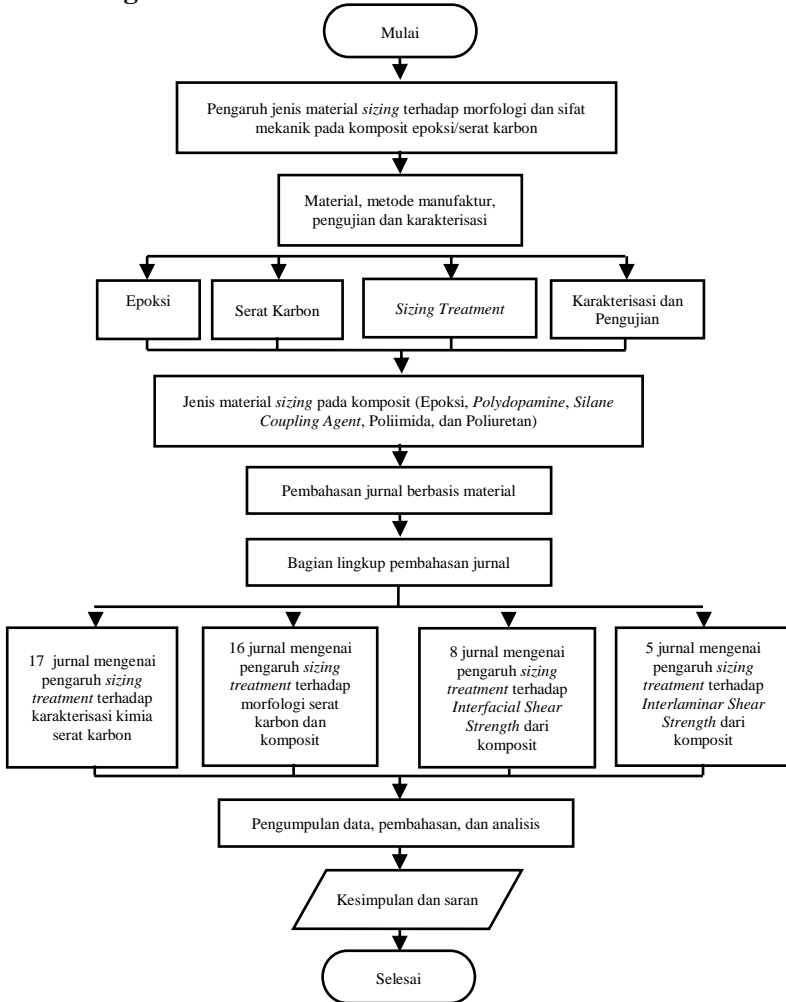
4. *Filament winding* yaitu metode dimana serat kontinu diposisikan secara akurat dalam pola yang telah ditentukan untuk membentuk bentuk berongga (biasanya silinder). Serat dimasukkan ke dalam rendaman resin dan kemudian secara terus-menerus digulung ke mandrel. Setelah jumlah lapisan yang sesuai diaplikasikan, *curing* dilakukan baik dalam oven atau pada suhu kamar, setelah itu di lepas dari mandrel (Callister, 2007).

5. *Vacuum infusion* yaitu teknik yang menggunakan tekanan vakum untuk mendorong resin menjadi laminasi. Serat diletakkan ke dalam cetakan di dalam ruang hampa. Setelah ruang hampa total tercapai, resin masuk ke dalam laminasi melalui pipa yang telah ditempatkan (Abdurohman, dkk, 2018).

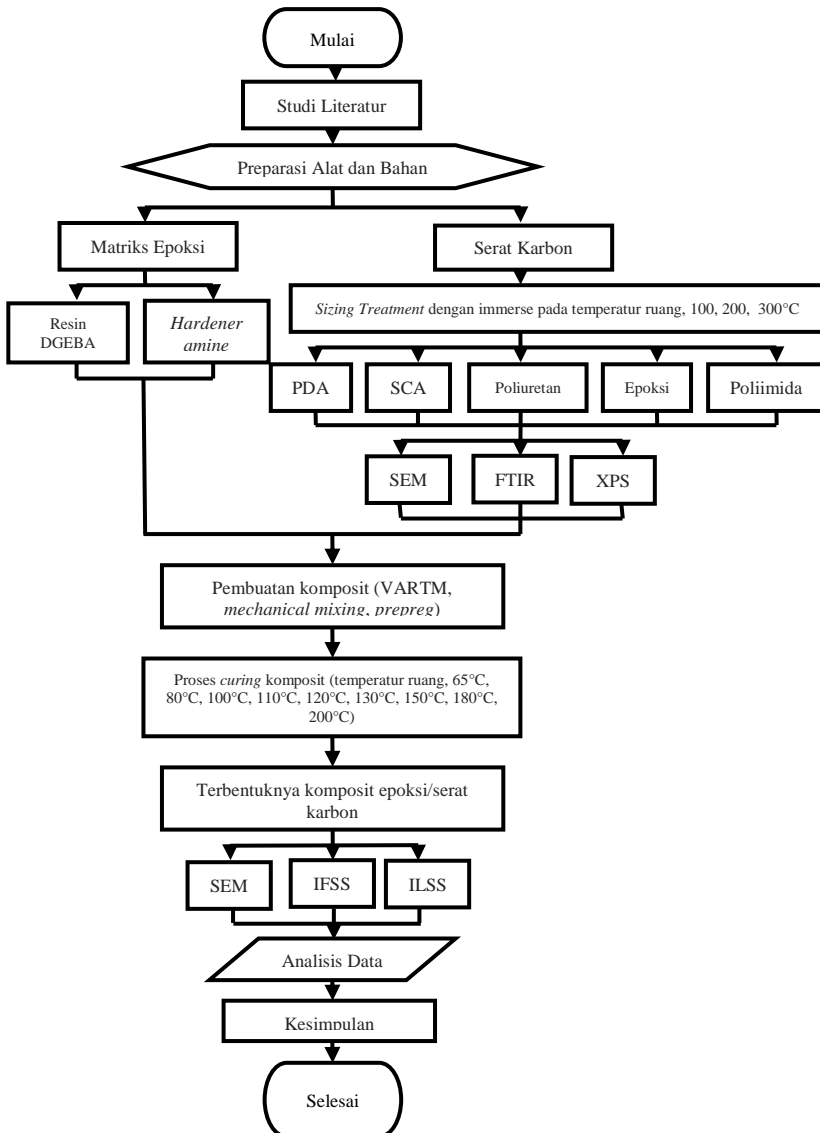
Resin transfer moulding (RTM) yaitu metode dimana satu set bagian cetakan dimuat dengan serat kemudian dijepit bersama. Resin kemudian dipompa, atau gravitasi dimasukkan ke dalam cetakan yang terdapat serat, setelah itu dibiarkan *curing*. Setelah *curing*, cetakan dipisahkan dan bagian dilepas untuk dipotong dan penyelesaian akhir (Adrian dan Gheorghe, 2010).

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir



Gambar 3.2 Diagram alir proses manufaktur komposit

Proses manufaktur dari komposit adalah sebagai berikut

1. Mempersiapkan alat dan bahan
2. Serat karbon diberi *sizing treatment* dengan melakukan immerse pada larutan *sizing* PDA, SCA, epoksi, poliuretan, dan poliimida (temperatur ruang, 100, 200, 300°C).
3. Menguji serat karbon dengan pengujian SEM, FTIR, dan XPS
4. Membuat matriks dengan mencampurkan resin *Diglycidyl Ether of Bisphenol A* dan *hardener* berbasis *amine*.
5. Membuat komposit epoksi/serat karbon (*VARTM, mechanical mixing, prepreg*)
6. Proses *curing* komposit (temperatur ruang, 65, 80, 100, 110, 120, 130, 150, 180, 200°C)
7. Menguji komposit epoksi/serat karbon dengan pengujian SEM, IFSS, dan ILSS.

3.2 Material dan Pengujian

Variabel pembahasan pada *review* ini yaitu berdasarkan jenis material *sizing* yang digunakan untuk *sizing treatment* pada serat karbon, yaitu *polydopamine*, *silane coupling agent*, epoksi, poliuretan, dan poliimida. Untuk material dan pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Material dan Pengujian

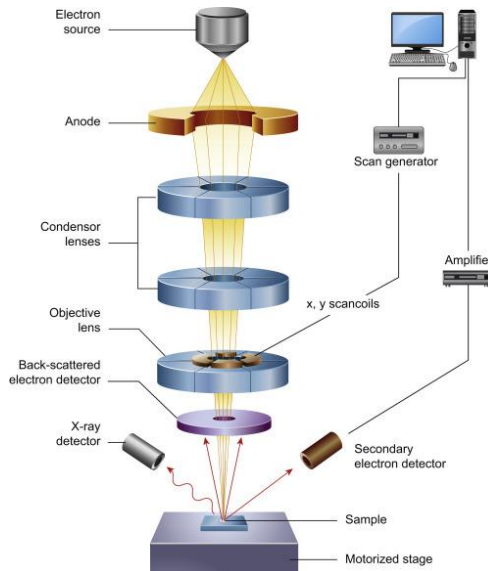
Matriks	Reinforce	Sizing	Pengujian	Referensi
Epoksi	Serat Karbon	<i>Polydopamine</i>	SEM	Han, dkk (2018) Kim dan Song (2018) Li, dkk (2019) Chen, Cao, dan Feng (2014)
			FTIR	Li, dkk (2019) Chen, Cao, dan Feng (2014)
			XPS	Chen, Cao, dan Feng (2014) Han, dkk (2018) Li, dkk (2019)

			IFSS	Han, dkk, (2018)
			ILSS	Han, dkk (2018)
Epoksi	Serat Karbon	<i>Silane Coupling Agent</i>		Yu, dkk (2014)
			SEM	Jiang, dkk (2015) Zheng, dkk (2016) Wen, dkk (2019)
			FTIR	Zheng, dkk (2016) Wen, dkk (2019)
				Yu, dkk (2014)
			XPS	Jiang, dkk (2015) Zheng, dkk (2016) Wen, dkk (2019)
			IFSS	Yu, dkk (2014) Zheng, dkk (2016) Wen, dkk (2019)
			ILSS	Wen, dkk (2019)
Epoksi	Serat Karbon	Epoksi		Fernandez, dkk (2004)
			SEM	Kafi, dkk (2014) Zhang (2015) Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016) Jiang, dkk (2015)
			FTIR	Zhang (2015) Ma, dkk (2016)
			XPS	Jiang, dkk (2015) Kafi, dkk (2014) Ma, dkk (2016)
			IFSS	Zhang (2015) Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016) Drzal dan Madhukar (1993)
			ILSS	Fernandez, dkk (2004) Kafi, dkk (2014)
				Andideh dan Esfandeh (2017)
Epoksi	Serat Karbon	Poliuretan	SEM	Zhang, dkk (2018) Gnadinger, Maddindorf, dan

					Fox (2016)
				FTIR	Zhang, dkk (2018)
					Dilsiz dan Wightman (2000)
				XPS	Andideh dan Esfandeh (2017)
					Zhang, dkk (2018)
					Dilsiz dan Wightman (2000)
				IFSS	Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016)
				ILSS	Andideh dan Esfandeh (2017)
					He, dkk (2011)
				SEM	Yuan, dkk (2015)
					Hassan, dkk (2019)
					He, dkk (2011)
Epoksi	Serat Karbon	Poliimida		FTIR	Yuan, dkk (2015)
					Hassan, dkk (2019)
				XPS	He, dkk (2011)
					Hassan, dkk (2019)
				IFSS	-
				ILSS	-

3.2.1 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM adalah salah satu dari mikroskop elektron yang sebagian besar digunakan untuk mengamati fenomena permukaan material. Sampel diambil dalam SEM menggunakan elektron berenergi tinggi, dan elektron/sinar-X yang keluar dianalisis. Elektron/sinar-X yang keluar ini memberikan informasi tentang topografi, morfologi, komposisi, orientasi butiran, informasi kristalografi, dan lainnya dari suatu bahan. Morfologi menunjukkan bentuk dan ukuran, sementara topografi menunjukkan fitur permukaan suatu benda atau bagaimana tampilannya, teksturnya, kehalusannya atau kekasarannya. Demikian juga, komposisi berarti unsur dan senyawa yang membentuk bahan, sedangkan kristalografi berarti susunan atom dalam bahan.



Gambar 3.3 Mekanisme SEM (Inkson, 2016)

Cara kerja SEM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3, dimulai dari *electron gun* yang memancarkan sinar elektron yang dilengkapi dengan katoda filamen tungsten. Kemudian elektron difokuskan pada *fine probe* yang di pindai melintasi permukaan spesimen. Elektron yang dipancarkan diperkuat oleh adanya suatu kumparan. Setelah itu berkas elektron utama mengenai permukaan sampel. Elektron yang bertubrukan yang dipercepat ke arah spesimen memiliki jumlah energi kinetik yang cukup besar, yang kehilangan energinya di dalam sampel dengan menghasilkan beberapa sinyal dari interaksi elektron dengan spesimen, akibatnya, ia akan memancarkan berbagai sinyal karena interaksi medan Coulomb (muatan listrik) dari elektron yang masuk dengan inti spesimen dan elektron, seperti elektron sekunder (SEs), *backscattered electron* (BSE), foton (sinar-X yang digunakan untuk analisis sebelumnya) dan cahaya tampak (*cathodoluminescence-CL*). Sinyal dikumpulkan oleh detektor, yang kemudian hasilnya akan diterjemahkan dan ditampilkan

dalam bentuk gambar pada layar. Elektron sekunder menghasilkan topografi dari benda yang dianalisis, permukaan yang tinggi berwarna lebih cerah dari permukaan rendah. Sedangkan *back-scattered electron* memberikan perbedaan berat molekul dari atom-atom yang menyusun permukaan, atom dengan berat molekul tinggi akan berwarna lebih cerah daripada atom dengan berat molekul rendah selain itu juga memberikan informasi jumlah atom rata-rata dari sampel (Inkson, 2016). EDX efektif dalam memberikan informasi konsentrasi elemen “*bulk*” pada sampel. Cara kerja dari *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* yaitu ketika elektron ditembakkan dan mengeluarkan elektron yang terdapat pada sampel dekat dengan nukleus yang menjadi elektron sekunder. Elektron yang berada dari kulit yang lebih tinggi akan berpindah ke tempat elektron dekat nukleus tadi dan akan mengeluarkan energi. Energi yang dikeluarkan ini dalam bentuk *X-ray*. Jika elektron dari kulit K keluar maka elektron dari kulit L akan mengisi, maka akan dihasilkan *x-ray* $K\alpha$, jika elektron yang mengisi berasal dari kulit M, maka akan dihasilkan *x-ray* $K\beta$. Begitu pula selanjutnya dari masing-masing kulit.

3.2.2 *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*

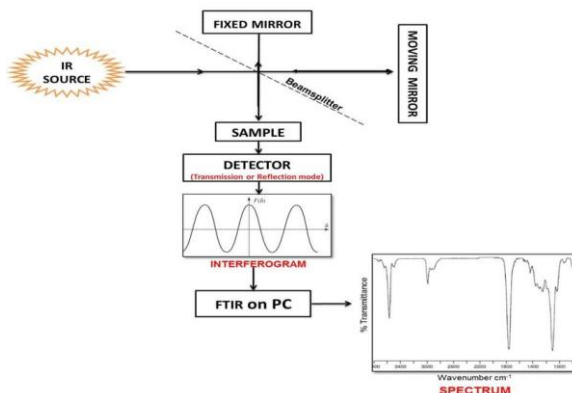
FTIR merupakan alat yang digunakan untuk melakukan analisis senyawa organik dan anorganik, selain itu juga menganalisis kualitatif yaitu untuk mengetahui ikatan kimia (gugus fungsi) beserta polanya yang dapat ditentukan dari spektra vibrasi yang dihasilkan oleh suatu senyawa pada panjang gelombang tertentu. FTIR dapat memberikan informasi mengenai material yang belum diketahui (teridentifikasi), mengenai kualitas sampel, dan mengetahui jumlah komponen dalam suatu campuran.. Dalam proses analisis FTIR, sampel mengalami kontak dengan radiasi inframerah Radiasi inframerah mengalami dampak pada molekul yang mengalami getaran atom, yang akan menghasilkan penyerapan atau transmisi energi tertentu. Setiap molekul memiliki penyerapan berbeda sesuai dengan pola vibrasi

dan pola ikatan antar atomnya sehingga menghasilkan frekuensi yang berbeda.

Prinsip kerja spektroskopi FTIR, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4, adalah adanya interaksi energi dengan material. Energi inframerah dipancarkan dari sumber, sinar kemudian melewati celah yang dapat mengontrol jumlah energi yang mengenai sampel, setelah itu sinar memasuki interferometer, kemudian dipancarkan melalui sampel, sebagian radiasi inframerah diserap sampel dan sebagian lain dipancarkan kembali dan tertangkap oleh detektor. Besarnya radiasi inframerah yang tertangkap oleh detektor kemudian diubah menjadi spektrum oleh Interferogram. Radiasi dari sumber melewati *beam splitter*, dengan satu sinar diarahkan ke cermin tetap dan yang lainnya ke cermin bergerak. Setelah dipantulkan dari cermin kemudian digabungkan kembali ke *beam splitter* dan diarahkan melalui sampel dan kemudian ke detektor. Jika panjang jalur ke cermin stasioner dan bergerak sama, maka ketika mereka digabungkan, maka akan terjadi *constructive interfere*. Jika panjang jalur ke cermin bergerak setengah panjang gelombang lebih panjang atau lebih pendek dari panjang jalur ke cermin tetap, maka akan terjadi *destructive interfere*. Ini akan menghasilkan sinyal keluaran minimum dari interferometer. Rekombinasi *beam* dengan panjang lintasan yang berbeda dalam interferometer menciptakan interferensi konstruktif dan destruktif yang disebut interferogram. *Beam* memasuki sampel dan sampel menyerap frekuensi energi tertentu jika memiliki energi yang sama dengan getaran ikatan yang terdapat pada sampel. Kemudian, detektor mengukur sinyal interferogram khusus dalam energi versus waktu untuk semua frekuensi secara bersamaan.

Selanjutnya pemrosesan komputer diperlukan untuk mengubah data mentah atau yang disebut interferogram (penyerapan cahaya untuk setiap posisi cermin) menjadi hasil yang diinginkan (penyerapan cahaya untuk setiap panjang gelombang). Pemrosesan yang diperlukan merupakan algoritma umum yang disebut transformasi Fourier. Transformasi Fourier

mengkonversi satu domain, dalam hal ini perpindahan cermin dalam cm, ke dalam domain terbalik yaitu bilangan gelombang dalam cm^{-1} . Intensitas tergantung dengan momen dipol, semakin besar momen dipol maka semakin intens. Semakin kuat ikatan dan semakin ringan atom maka akan semakin tinggi nilai *wavenumber* (Mohamed, dkk, 2017).



Gambar 3.4 Mekanisme FTIR (Kumari, Kaur, Bhattacharyya, 2018)

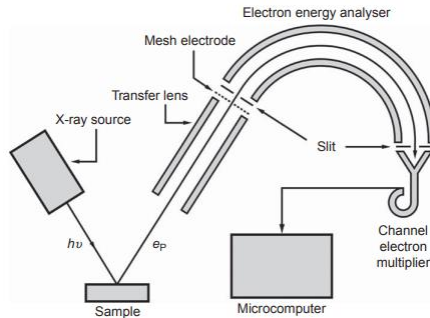
3.2.3 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

XPS adalah teknik analisis kuantitatif permukaan-sensitif yang menganalisis energi fotoelektron (50-2000 eV) yang dipancarkan ketika suatu permukaan dihujani dengan sinar-X dalam ruang hampa. XPS dapat mengukur komposisi unsur permukaan suatu material, dan juga menentukan keadaan ikatan unsur-unsur tersebut. Atom pada permukaan memiliki puncak karakteristik dalam spektrum XPS. Energi dan intensitas puncak ini memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi semua elemen permukaan yang ada (kecuali hidrogen). Setiap elemen memiliki energi pengikat karakteristik yang terkait dengan tingkat elektron intinya. Energi kinetik (EK) yang diukur dari fotoelektron yang dikeluarkan ditentukan oleh energi yang masuk dari foton sinar-

X, $h\nu$ (Konno, 2016). Energi pengikat, BE, dari fotoelektron dihitung oleh Persamaan 3.1.

$$EK = h\nu - BE \quad (3.1)$$

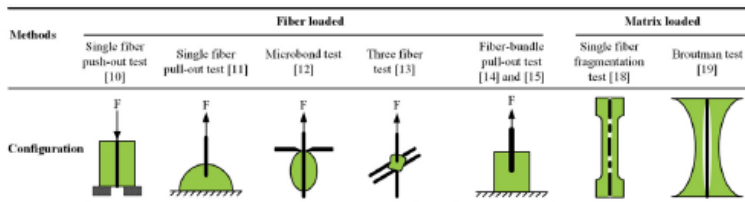
Pengujian XPS dilakukan di dalam keadaan vakum untuk menghindari tabrakan antara fotoelektron dan molekul gas dalam spektrometer dan meminimalkan kontaminasi permukaan dari gas residu. Spektrometer fotoelektron X-ray yang khas terdiri dari sumber sinar-X, penganalisis energi elektron, dan detektor fotoelektron. Sumber sinar X umum adalah Al Ka (1486.6 eV) dan Mg Ka (1253.6 eV). Fotoelektron yang dikeluarkan ditransfer ke penganalisis energi elektron melalui lensa elektron dan dipisahkan sesuai dengan energi kinetiknya. Setelah analisis energi, fotoelektron terdeteksi oleh perangkat seperti *channel plate* (Seyama, Soma, dan Theng, 2013), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Energi yang masuk dari foton berinteraksi dengan elektron pada sampel dan memberikan energi kepada elektron tersebut untuk keluar dari sampel menjadi energi kinetik. Maka dari itu dibutuhkan frekuensi yang tinggi agar mendapatkan energi sesuai dengan yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron dan jumlah elektron yang keluar akan meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya. Energi kinetik yang rendah akan menghasilkan energi ikat yang tinggi yang sesuai dengan konfigurasi elektron. Energi ikat semakin besar jika elektron berada di dekat nukleus. Semakin tinggi *nuclear charge* maka *peak* pada spektra akan bergeser ke energi ikat yang lebih tinggi.



Gambar 3.5 Mekanisme XPS (Seyama, Some, dan Theng, 2013)

3.2.4 Interfacial Shear Strength (IFSS)

Kinerja komposit polimer dengan *reinforced* serat karbon sebagian besar bergantung pada sifat-sifat *interface* antara serat dan matriks. Ikatan *interface* yang baik sangat penting untuk memastikan transfer beban yang efisien dari matriks ke serat, yang membantu mengurangi konsentrasi tegangan dan meningkatkan sifat mekanik keseluruhan pada komposit. Untuk menentukan parameter interaksi *interface* antara serat dan matriks, cukup banyak metode pengujian telah dikembangkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 (Zhou, dkk, 2016).

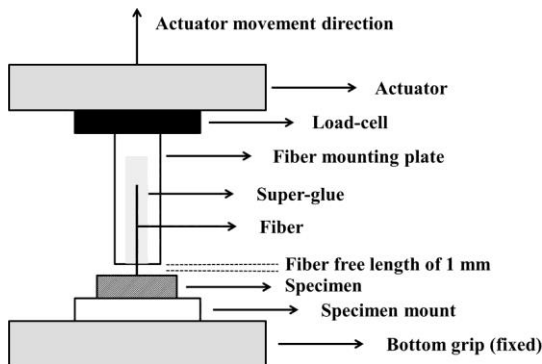


Gambar 3.6 Metode untuk menentukan nilai IFSS (Zhou, dkk, 2016).

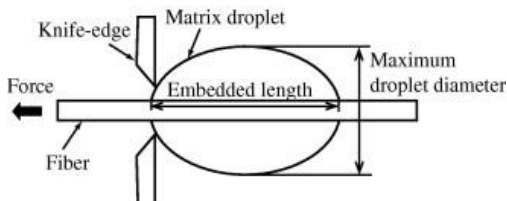
Pada Persamaan 3.2 ditunjukkan persamaan untuk mendapatkan nilai IFSS τ dimana F adalah beban uji maksimum

yang diukur dari pengujian dan πDL menandakan area *fiber-embedded*, dimana L merupakan produk dari panjang serat yang tertanam dalam epoksi dan D adalah diameter dari serat. Mekanisme dari *single fiber pull out test* ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan mekanisme dari *microbond test* ditunjukkan pada Gambar 3.8.

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi DL} \quad (3.2)$$



Gambar 3.7 Mekanisme *single fiber pull out test* (Fahad, dkk, 2019)

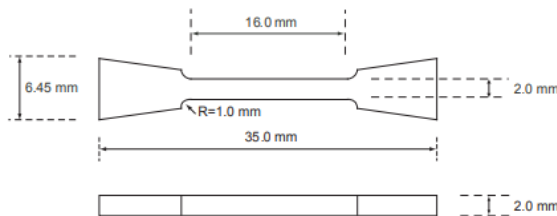


Gambar 3.8 Mekanisme *microbond test* (Nishikawa, dkk, 2008)

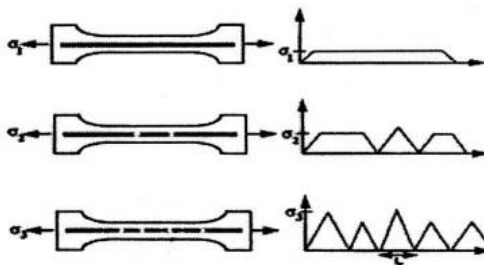
Pada pengujian IFSS dengan menggunakan metode *single fiber fragmentation test* (SFFT) ditunjukkan pada Persamaan 3.3, dimana σ_{0c} adalah kekuatan filamen serat, D adalah diameter

serat, dan L_c adalah panjang fragmen kritis. Spesimen pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 3.9. Mekanisme pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.10. Strain gauge adalah alat untuk mendeteksi regangan pada material. Ketika material diberi beban, akan terjadi perubahan resistivitas listrik. Ketika beban ditarik, kawat yang berada pada strain gage ikut mengalami deformasi sehingga terjadi perubahan resistansi. Resistansi diukur dalam *wheatstone bridge* yang kemudian hasilnya menunjukkan regangan. Data tersebut digunakan untuk mendapatkan tegangan dengan menggunakan prinsip hukum hooke.

$$\tau = \frac{\sigma_{oc} D}{2 Lc} \quad (3.3)$$



Gambar 3.9 Spesimen pengujian SFFT (Feih, dkk, 2004)

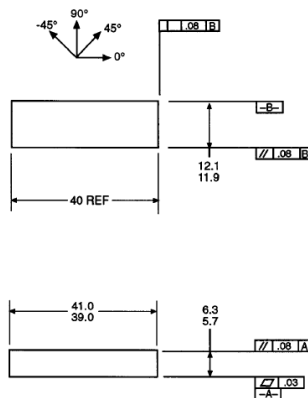


Gambar 3.10 Mekanisme pengujian SFFT (Feih, dkk, 2004)

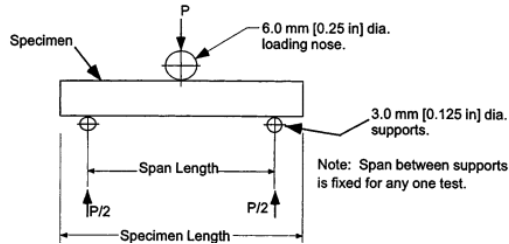
3.2.5 Interlaminar Shear Strength (ILSS)

Interlaminar shear strength (ILSS) adalah salah satu parameter terpenting untuk desain struktur komposit laminasi dalam menentukan kemampuan komposit untuk menahan kerusakan delaminasi. Pengujian ILSS dilakukan dengan menggunakan metode *3-point short beam strength* dengan menggunakan standar ASTM D-2344. Sampel dimuat dalam konfigurasi *3-point bending* sebagai penyangga sederhana menggunakan penyangga silinder dengan diameter 3 mm dan *loading nose* dengan diameter 6 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12. Panjang sampel adalah 6 kali ketebalan sampel dan lebar 2 kali ketebalan sampel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11. Nilai ILSS dapat ditentukan dengan Persamaan 3.3, dimana P adalah maksimal beban untuk patah, b adalah lebar, dan d adalah ketebalan spesimen.

$$ILSS = 0,75 \frac{P}{bd} \quad (3.4)$$



Gambar 3.11 Spesimen pengujian ILSS (ASTM D2344)



Gambar 3.12 Mekanisme pengujian ILSS (ASTM D-2344)

3.3 Ruang Lingkup Pembahasan

Ruang lingkup pembahasan yang akan dilakukan pada *review* ini dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Ruang Lingkup Pembahasan

Material	SEM	FTIR	XPS	IFSS	ILSS
<i>Polydopamine</i>	√	√	√	√	√
<i>Silane coupling agent</i>	√	√	√	√	√
Epoksi	√	√	√	√	√
Poliuretan	√	√	√	√	√
Poliimida	√	√	√	-	-

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 *Polydopamine*

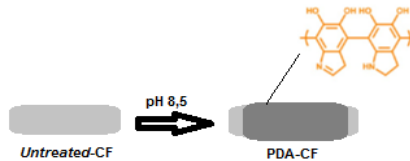
Polydopamine (PDA) banyak digunakan pada aplikasi yang signifikan dalam bidang biomedis dan mekanik, karena daya rekatnya yang unggul pada berbagai permukaan material termasuk logam, oksida, polimer, dan keramik. PDA digunakan sebagai material untuk *sizing treatment* pada serat karbon karena adhesi serat karbon yang lemah dengan matriksnya. PDA dapat meningkatkan ikatan *interface* dari komposit serat karbon. Material yang digunakan pada *sizing treatment* yaitu serat karbon pendek dengan diameter $10\mu\text{m}$ dan panjang $200\mu\text{m}$ yang diproduksi oleh Toray Industries Inc., Jepang. *Hydroxyphenethylamine hydrochloride* (dopamine, 98%) dan *tris(hydroxy-methyl) aminomethane* (TRIS, 99%) didapatkan dari Sigma-Aldrich. Resin epoksi dengan viskositas ~ 2500 MPa s (40°C) dan epoksida 0.48–0.54 eq/100 g yang didapatkan dari Bluestar Wuxi Petrochemical Co. Ltd., Cina. *Curing agent Triethylenetetramine* (TETA) yang didapatkan dari Aladdin Reagent Corp, Cina (Chen, Cao, dan Feng, 2014).

Metode manufaktur dari *sizing treatment* dengan PDA yaitu dengan melarutkan *dopamine* (1,5 g/L) dalam larutan buffer TRIS-HCl (1M HCl, TRIS *tris-(hydroxy-methyl) aminomethane* 40 mM) dengan pH 8,5. Selanjutnya, serat karbon dimasukkan ke dalam larutan *dopamine* dan diletakkan di *magnetic stirrer* pada temperatur ruang selama 24 jam, setelah itu, serat karbon dibersihkan dengan air deionisasi beberapa kali hingga air tidak berwarna untuk menghilangkan sisa *dopamine*, lalu serat karbon dikeringkan di *vacuum oven* pada temperatur 40°C selama 24 jam (Han, dkk, 2018).

4.1.1 Karakteristik Kimia Serat Karbon

Karakteristik kimia serat karbon *sizing* PDA dapat dilihat dengan pengujian FTIR, seperti yang dilakukan pada penelitian

Chen, Cao, dan Feng (2014). Setelah dilapisi dengan PDA, *peak* O-H menjadi lebih kuat dan luas. Selain itu, muncul *peak* baru yaitu N-H *shearing*. Li, dkk (2019) juga mendapatkan pada serat karbon tanpa *treatment* tidak terlihat *peak* yang jelas. Pada serat karbon dengan *sizing* PDA terlihat *peak* baru yang luas yaitu N-H *stretching* dan aromatik O-H. Selain itu, beberapa *peak* lainnya yaitu C-OH, C-N *stretching*, N-H *twist*, dan aromatik C=C, yang mengindikasikan polimerisasi dopamin terjadi pada permukaan serat karbon. *Peak* O-H yang terdapat pada hasil penelitian tersebut berasal dari katekol pada PDA. Munculnya beberapa *peak* dengan gugus fungsi yang mengandung oksigen dan nitrogen konsisten dengan homopolimer PDA dan dopamin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Untuk mekanisme *sizing* dengan PDA dapat dilihat pada Gambar 4.1. Hasil pengujian FTIR ditunjukkan pada Tabel 4.1



Gambar 4.1 Mekanisme *sizing* dengan PDA

Tabel 4.1 Hasil Pengujian FTIR dengan *sizing* PDA

Referensi	Sebelum <i>Sizing</i>		Sesudah <i>Sizing</i>	
	Wave- Number (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Wave- Number (cm^{-1})	Gugus Fungsi
Chen, Cao, dan Feeng (2014)	1625	C=C	3422	O-H
	3421	O-H	1513	N-H
			1625	C=C
Li, dkk (2019)	-	-	3100-3600	O-H, N-H
			1050	C-OH
			1292	C-N
			1510	N-H
			1610	C=C

Pada hasil pengujian XPS Chen, Cao, dan Feng (2014), setelah pelapisan dengan PDA, intensitas sinyal *peak* N1s dan O1s menjadi lebih kuat. Dalam spektrum N1s dari serat karbon dengan *sizing* PDA, *peak* intens baru muncul pada energi ikat 399,8 eV yaitu $-NH-$. Rasio N/C dari permukaan serat karbon dengan *sizing* PDA adalah 0,095, dekat dengan nilai teoretis 0,125 untuk dopamin. Han, dkk (2018) juga mendapatkan konsentrasi unsur karbon dan oksigen adalah konstituen utama pada permukaan serat karbon dan serat karbon dengan *sizing* PDA. Serat karbon dengan *sizing* PDA terdapat *peak* karbon C-N dan C-O-C dan terdapat *peak* N1s. Pada hasil pengujian XPS Li, dkk (2019) juga didapatkan *peak* N1s yang muncul ketika serat karbon diberi *sizing* PDA. Hasil pengujian XPS ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3. Komponen *peak* C-N juga biasanya terdapat pada serat karbon tanpa perlakuan, namun lemah. *Peak* ini disebabkan oleh struktur pirol dan piridin, yang terbentuk selama preoksidasi dan karbonisasi yang belum selesai dari prekursor berbasis PAN. *Sizing* PDA dapat meningkatkan presentase oksigen, rasio atom O/C, dan N/C, karena kelompok katekol, kuinon dan amino polimer PDA. Kandungan oksigen dan amina yang lebih tinggi pada serat karbon dengan *sizing* PDA diharapkan dapat meningkatkan polaritas dan reaktivitas serat karbon. Selain itu, serat karbon dengan *sizing* PDA diharapkan dapat memasok lebih banyak situs reaktif untuk ikatan *interface*, yang akan menghasilkan peningkatan interaksi serat dan matriks. Selain itu, pengenalan gugus polar ekstra dapat mempengaruhi energi permukaan serat, yang terkait erat dengan *wettability* antara serat dan matriks(Chen, Cao, dan Feng, 2014; Han, dkk, 2018; Liu, dkk, 2015).

Tabel 4.2 Hasil Pengujian XPS serat karbon dengan *sizing* PDA

Referensi		Sebelum <i>Sizing</i>		Sesudah <i>Sizing</i>	
		<i>Peak</i> (eV)	Gugus Fungsi	<i>Peak</i> (eV)	Gugus Fungsi
Chen, Cao,dan	C1s	284,7	C-C	284,7	C-C
		285,5	C-N	285,5	C-N

Feng (2014)		286,0	C-O	286,0	C-O
				287,6	C=O
				289,1	O-C=O
				398,8	=N=
				401,7	N ⁺
	N1s	398,8	=N=	401,7	N ⁺
		401,7	N ⁺	399,8	-NH-
				284-285	C-C
		284-285	C-C	286-287	C-O
	C1s	286-287	C-O	287,7	C-N
		288-289	C=O	288-289	C=O
Han, dkk (2018)				289,4	C-O-C
				398,5	-NH ₂ -
				400,1	-NH-
				401,8	-N=
				533	C-O
	O1s	533	C-O	534	C=O

Tabel 4.3 Komposisi atom pada permukaan serat karbon (Chen, Cao, dan Feng, 2014).

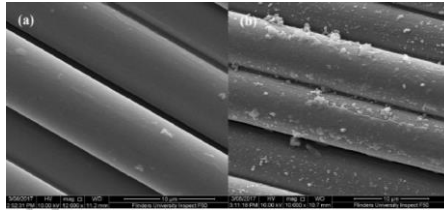
Sample	Komposisi atom		
	Karbon	Oksigen	Nitrogen
<i>Desized-CF</i>	70,32	10,79	2,95
PDA-CF	71,25	19,12	6,72

Untuk data-data yang disajikan oleh beberapa penelitian mendapatkan hasil yang sama, namun pada penelitian yang dilakukan Han, dkk (2018) mendapatkan hasil pengujian XPS yang berbeda. Hasil XPS mendapatkan bahwa konsentrasi dari oksigen menurun setelah diberi *sizing* dengan PDA. Hasil ini sangat berbeda dengan beberapa penelitian lainnya yang mengatakan bahwa konsentrasi oksigen meningkat setelah di beri *sizing treatment*. Penyebab dari penurunan konsentrasi oksigen ini tidak dijelaskan. Secara teori seharusnya gugus katekol dari PDA dapat meningkatkan konsentrasi oksigen pada serat karbon yang diberi *sizing treatment* dengan PDA. Selain itu Han, dkk (2018) juga tidak menyajikan angka pasti secara kuantitatif dari konsentrasi masing-masing elemen yang terdapat pada serat

karbon. Selain Han, dkk (2018), Li, dkk (2019) juga hanya memberikan gambar spektra *wide-scan*, tidak ada angka pasti berapa konsentrasi dari masing-masing elemen. Pembaca dapat melihat sedikit perbedaan antara serat karbon tanpa perlakuan dan dengan perlakuan dari gambar spektra tersebut, namun untuk angka pasti nya tidak ada, sehingga sulit untuk membandingkan hasil kuantitatif karakteristik kimia dari permukaan serat karbon penelitian tersebut dengan penelitian lainnya.

4.1.2 Morfologi Serat Karbon dan Komposit

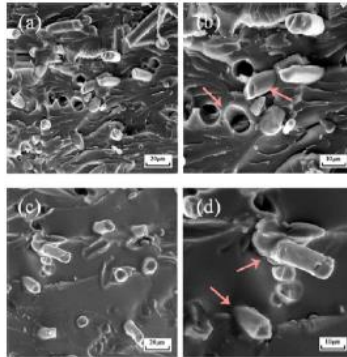
Morfologi serat karbon pada penelitian dilakukan oleh Chen, Cao, dan Feng (2014) dengan pengujian SEM. Pada serat karbon *desized* terdapat tekstur alur di sepanjang serat karbon akibat karbonisasi dari prekursor berbasis PAN, namun menjadi tidak terlihat ketika diberi lapisan PDA. Pada penelitian Han, dkk (2018), serat karbon yang telah diberi *sizing* PDA memiliki permukaan yang cukup kasar dibandingkan serat karbon tanpa perlakuan yang memiliki permukaan yang cukup halus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dengan perbesaran 12.000 kali. Peningkatan kekasaran morfologi dari serat karbon ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan Li, dkk (2019). Permukaan serat karbon yang diberi *sizing treatment* menjadi lebih kasar dibandingkan dengan serat karbon tanpa perlakuan. Perbedaan morfologi tersebut mengindikasikan bahwa polimerisasi dopamin pada serat karbon berhasil dilakukan. Kim dan Song (2018) juga mendapatkan bahwa permukaan serat yang diberi *sizing treatment* dengan PDA memiliki zat putih yang melekat pada permukaan serat karbon. Peningkatan konsentrasi PDA dapat meningkatkan kepadatan zat putih dan ketebalan lapisan. Keberadaan lapisan PDA ini akan terus bertambah seiring bertambahnya konsentrasi dari *sizing* PDA yang membuat morfologi dari serat karbon menjadi semakin kasar (Ho dan Ding, 2014).



Gambar 4.2 Morfologi serat karbon a) tanpa perlakuan b) *sizing* PDA (Han, dkk, 2018)

Untuk morfologi dari komposit epoksi/serat karbon, Chen, Cao, dan Feng (2014) dan Li, dkk (2019) mendapatkan bahwa pada komposit epoksi/serat karbon *desized* terjadi *pull-out* dan *debonding* diantara serat karbon dan matriks epoksi. Kondisi permukaan dari serat karbon *desized* yaitu halus dan tidak terdapat matriks epoksi pada permukaan serat. Pada komposit epoksi/serat karbon-PDA menunjukkan *interface* yang hampir mulus antara epoksi dan serat karbon. *Gaps* antara serat dan matriks berkurang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Han, dkk (2018) juga mendapatkan morfologi patahan serat karbon tanpa perlakuan memiliki permukaan yang halus. Resin epoksi pada komposit serat karbon tanpa perlakuan cenderung sepenuhnya terlepas dari serat karbon. Pada komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* PDA, serat karbon masih berikatan dengan epoksi. Morfologi komposit dari penelitian Kim dan Song (2018) mendapatkan bahwa *interface* antara serat dan resin dengan komposisi TRIS 40mM PDA 1,5g/L lebih terlihat mulus. Serat karbon patah dalam keadaan resin masih melekat dengan serat dan panjang *debonding* serat lebih pendek. Sedangkan pada komposisi TRIS 10mM PDA 1,5 g/L, permukaan serat debonded lebih halus dan panjang *debonding* serat besar. Maka dari itu didapatkan bahwa konsentrasi dari *sizing* menentukan ikatan *interface* antara serat dan matriks. Interaksi *interface* antara lapisan PDA dan matriks epoksi didominasi oleh ikatan hidrogen antara kelompok katekol dan kelompok epoksi. Interaksi lain yang mungkin yaitu ikatan kovalen antara kelompok amina dari

hardener dan lapisan PDA serta ikatan antara molekul epoksi dan kelompok imine dari PDA (Chen, Cao, dan Feng, 2019).



Gambar 4.3 Hasil pengujian SEM a,b) *desized*-SCFs/EP c,d) PDA-SCFs/EP (Chen, Cao, dan Feng, 2014).

Untuk data-data dari beberapa penelitian tersebut, terdapat perbedaan morfologi dari serat karbon yang dilakukan oleh Chen, Cao, dan Feng (2014). Pada penelitian Chen, Cao dan Feng (2014) tidak menyebutkan bahwa morfologi dari serat karbon mengalami peningkatan kekasaran, berbeda dengan morfologi serat karbon yang dilakukan oleh penelitian lainnya. Kim dan Song (2019) juga tidak menyebutkan bahwa serat karbon mengalami peningkatan kekasaran. Namun pada hasil SEM, terdapat perbedaan yang signifikan antara serat karbon tanpa perlakuan dan dengan *sizing* PDA. Perbedaan tersebut juga dapat mengindikasikan kekasaran permukaan yang berbeda antara sebelum diberi perlakuan dan sesudah diberi perlakuan. Sedangkan morfologi serat karbon pada penelitian Chen, Cao, dan Feng (2014) tidak terlalu terlihat perbedaan yang signifikan kecuali tekstur alur pada serat karbon yang menjadi tidak terlihat setelah diberi *sizing* dengan PDA.

4.1.3 IFSS (*Interfacial Shear Strength*) dari Komposit

Pengujian IFSS pada komposit epoksi/serat karbon yang dilakukan oleh Han, dkk (2018) dengan menggunakan metode *single fiber pull-out test* mengalami kenaikan nilai IFSS. Kenaikan nilai IFSS sebesar 25% didapatkan dengan penggunaan *sizing* PDA pada serat karbon, yaitu dari 12,36 MPa menjadi 15,44 MPa. Kenaikan nilai IFSS ini disebabkan karena lapisan PDA pada permukaan serat karbon meningkatkan gesekan pada *interface* yang rusak. Pada komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan, resin epoksi cenderung sepenuhnya terlepas dari serat karbon dan mempertahankan permukaan yang relatif halus. Respons ini disebabkan oleh energi ikat yang lemah antara permukaan epoksi dan serat karbon. Pada serat karbon dengan *sizing* PDA, retakan merambat melalui *interface* PDA dan epoksi dengan jalur retakan tidak lurus dan serat sisa ditangkap oleh epoksi, yang menunjukkan bahwa *sizing* PDA meningkatkan lapisan *interface*. Lapisan PDA dapat meningkatkan transfer beban antara permukaan epoksi dan serat karbon. Kenaikan IFSS ini juga dikarenakan meningkatnya interaksi *interface* antara lapisan PDA dan matriks epoksi karena kelompok fungsional reaktif dari serat karbon dan PDA. Kelompok fungsional pada serat karbon dan PDA dapat meningkatkan ikatan kimia yang baik dengan matriks polimer, yang telah dijelaskan di karakteristik kimia dari permukaan serat karbon. Selain itu perubahan morfologi serat karbon menjadi lebih kasar juga dapat meningkatkan *interlocking* mekanik sehingga ada banyak titik kontak antara serat dan matriks (Tiwari dan Bijwe, 2014).

4.1.4 ILSS (*Interlaminar Shear Strength*)

Pengujian ILSS komposit epoksi/serat karbon dilakukan oleh Han, dkk (2018) dengan *3-point short beam strength test*. Hasil pengujian didapatkan nilai ILSS dari komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* PDA mengalami kenaikan sebesar 25% dari 54,1 MPa menjadi 67,7 MPa. Kenaikan nilai ILSS komposit epoksi/serat karbon-PDA dibandingkan komposit epoksi/serat

karbon tanpa perlakuan membuktikan ikatan *interface* antara matriks dan serat yang lebih baik. Transfer tegangan menjadi lebih efisien pada komposit epoksi/serat karbon-PDA, karena nilai ILSS ini bergantung dengan kekuatan *interface* dari matriks dan serat. Pengujian ILSS dikatakan akurat jika kegagalan yang terjadi dimulai dari kegagalan *interface*. Kenaikan nilai ILSS ini juga disebabkan oleh bertambahnya gugus fungsi pada permukaan serat karbon sehingga meningkatkan ikatan pada *interface* yang juga meningkatkan ikatan *interlaminar*. Perubahan morfologi serat karbon menjadi lebih kasar juga menjadi salah satu faktor dari kenaikan nilai ILSS dari komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* PDA.

4.2 *Silane Coupling Agent*

Silane coupling agent (SCA) banyak digunakan sebagai *sizing treatment* pada serat karbon karena SCA dianggap efektif pada modifikasi permukaan serat karbon. SCA memiliki sejumlah besar gugus fungsi yang dapat bereaksi dengan permukaan serat karbon dan akan membentuk ikatan kovalen dengan kelompok fungsional dari matriks. Kelompok fungsional berlimpah ini dapat secara efektif meningkatkan *wettability* permukaan serat karbon dan meningkatkan kompatibilitas antara serat karbon dan matriks resin (Wen, dkk, 2019). Material yang digunakan pada *treatment* ini yaitu pada penelitian Zheng, dkk (2016), serat karbon yang digunakan yaitu T300 yang didapatkan dari Toray Industries, Inc, Jepang. Resin epoksi yang digunakan yaitu E-51 dan *hardener* H-256. Untuk SCA yang digunakan yaitu *methyltrimethoxysilane* ($\text{CH}_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$, MS, 96%), *γ -aminopropyl triethoxysilane* ($\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$, APS, 97%) dan *γ -glycidoxypropyl trimethoxysilane* ($\text{CH}_2\text{OCHCH}_2\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$, GPS, 99%), yang didapatkan dari Aldrich Chemical Co. Pada penelitian Jiang, dkk (2015), SCA yang digunakan yaitu [3-(2-Aminoethyl)aminopropyl] trimethoxysilane, yang didapatkan dari Aladdin. Pada penelitian Wen, dkk (2019), SCA yang digunakan yaitu 3-aminopropyl triethoxysilane $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$, yang

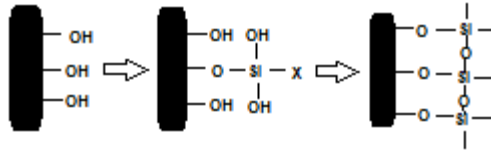
didapatkan dari Nanjing Genesis Chemical Auxiliaries Co., Ltd. Sedangkan pada penelitian Yu, dkk (2014), SCA yang digunakan yaitu (*3-glycidyloxypropyl trimethoxysilane*), yang didapatkan dari Sigma-Aldrich.

Sizing treatment dimulai dengan membuat larutan *silane* dengan mencampurkan 1,5 wt% ke dalam campuran *methanol* dan air dengan perbandingan 9:1. Setelah itu serat karbon dimasukkan pada larutan tersebut selama 1 jam dengan *ultrasonic*. Selanjutnya serat karbon dibersihkan dengan air deionisasi untuk menghilangkan sisa SCA. Setelah itu serat karbon dikeringkan dengan *vacuum oven* pada temperatur 80°C semalaman (Jiang, dkk, 2015).

4.2.1 Karakteristik Kimia Serat Karbon

Penelitian *sizing treatment* dengan SCA dilakukan oleh Zheng, dkk (2016) dengan menggunakan tiga jenis SCA. Pada serat karbon tanpa perlakuan, tidak ada *peak* yang jelas pada spektra FTIR. Pada serat karbon dengan *sizing* SCA terdapat *peak stretching* dari kelompok hidroksil di semua sampel yang diberi *treatment* SCA. *Peak* penyerapan baru yaitu *peak stretching* -Si-O-C dan -Si-O-Si ditemukan dalam spektrum semua serat karbon yang telah dimodifikasi dengan SCA. Wen, dkk (2019) mendapatkan dua *peak* pada yaitu *stretching* gugus karbonil C=O dan gugus hidroksil O-H pada serat karbon tanpa perlakuan. Setelah diberi *sizing* dengan SCA terdapat *peak* pada 3350 cm⁻¹ yaitu Si-OH karena transformasi kimia dari Si-O-R menjadi Si-OH. Serat karbon dengan *sizing* SCA dapat memunculkan gugus fungsi yang khas yaitu Si-O-Si atau Si-O-C. *Peak* -Si-O-C mengkonfirmasi reaksi dehidrasi dan kondensasi antara SCA dan serat karbon telah terjadi. *Peak* -Si-O-Si- menunjukkan pembentukan rantai polisiloksan oleh reaksi kondensasi antara molekul silane. Kelompok -Si(OCH₃)₃ atau -Si(OC₂H₅)₃ pada SCA dihidrolisis untuk menghasilkan kelompok -Si(OH)₃. Kelompok -Si(OH)₃ dikombinasikan dengan permukaan serat karbon yang telah terhidroksilasi dengan proses dehidrasi dan

kondensasi untuk membentuk ikatan Si-O-C, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 (Zheng, dkk, 2016; Yu, dkk, 2014). Hasil pengujian FTIR ditunjukkan pada Tabel 4.4



Gambar 4.4 Mekanisme *sizing treatment* dengan SCA

Tabel 4.4 Hasil FTIR serat karbon dengan *sizing* SCA

Referensi	Sebelum <i>Sizing</i>		SCA	Setelah <i>Sizing</i>	
	Wave-number (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi		Wave-number (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
Zheng, dkk (2016)	-	-	Metil Silane	3448	-OH
				1634	
				2925	Asimetris
				2848	simetris - CH ₃
				1107	-Si-O-C-
				1021	-Si-O-Si-
			Amino Silane	3448	-OH
				1634	
				3440	Hidroksil & amino
				1107	-Si-O-C-
				1021	-Si-O-Si-
				3448	-OH
-	-	-	Epoksi Silane	1634	
				1261	Cincin
				874	Epoksi
				1107	-Si-O-C-
				1021	-Si-O-Si-
Wen, dkk (2019)	1634	C=O	Amino Silane	3350	Si-OH
	3350	O-H			

Pada hasil pengujian XPS yang dilakukan Yu, dkk (2014), serat karbon dengan *sizing* SCA jenis epoksi silane. Gugus fungsi epoksida yang terdapat pada serat karbon tanpa perlakuan dikarenakan serat karbon masih memiliki *sizing* epoksi komersil. Persentase gugus C-O-C/epoksida pada permukaan serat karbon *sizing* SCA adalah 61,5% lebih tinggi dari pada serat karbon yang diterima dikarenakan kandungan epoksi pada jenis SCA yang digunakan pada penelitian ini. Hanya terdapat satu *peak* pada 103,3 eV yaitu Si-O-Si yang ditemukan pada permukaan serat karbon tanpa perlakuan. Selain *peak* pada 103,1 eV, *peak* lain pada 101,6 eV yaitu Si-O-C yang ditemukan pada permukaan serat karbon dengan *sizing* SCA.

Jiang, dkk (2015) juga melakukan pengujian XPS pada permukaan serat karbon sebelum dan sesudah diberi *sizing* dengan SCA jenis amino silane dan *sizing* epoksi. Pada serat karbon dengan SCA muncul *peak* N1s, Si2s, dan Si2p. Untuk serat karbon dengan SCA terdapat *peak* baru yaitu pada 284,2 eV C-Si yang berasal dari molekul silane. Keberadaan *peak* Si pada serat karbon dengan *sizing* SCA juga didukung oleh hasil penelitian Zheng, dkk (2016). Pada serat karbon tanpa perlakuan tidak terdapat elemen Si, namun pada serat karbon dengan *sizing* beberapa jenis SCA terdapat elemen Si, yang menandakan adanya oligomer *siloxane* pada permukaan serat karbon.

Wen, dkk (2019) mendapatkan kandungan elemen karbon pada permukaan sampel serat karbon tanpa perlakuan yaitu 81,12%, dengan rasio N/C dan O/C yang juga relatif rendah. Persentase oksigen, silikon dan unsur nitrogen pada permukaan serat karbon dengan SCA sangat meningkat, begitu pula dengan rasio N/C, O/C dan Si/C yang meningkat secara signifikan. Penurunan kelompok C-OH yang signifikan disebabkan kelompok silane yang telah dhidrolisis dan diubah menjadi kelompok silanol reaktif akan bereaksi dengan kelompok C-OH pada permukaan serat karbon. Komposisi pada permukaan serat karbon sesuai dengan masing-masing jenis SCA seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Komposisi pada permukaan serat karbon

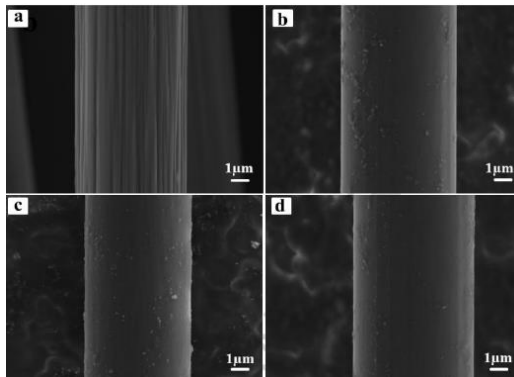
Ref	Treatment	Komposisi atom			
		C	O	N	Si
Yu, dkk (2014)	Sizing epoksi	78,4	20,7	-	0,9
	Epoksi silane	64,7	29,1	-	6,2
Jiang, dkk (2015)	Sizing epoksi	71,6	26,9	1,5	-
	Desized	85,5	11,8	2,7	-
	Amino silane	64,4	24,8	3,6	7,2
Zheng, dkk (2016)	Untreated	78,28	16,97	4,75	-
	Metil silane	75,01	19,37	1,48	4,14
	Amino silane	72,65	19,26	4,51	3,58
	Epoksi silane	77,89	18,27	1,84	2,00
Wen, dkk (2019)	Untreated	81,12	17,69	0,87	0,32
	Amino silane	70,60	19,25	4,46	5,69

Dari data-data karakteristik kimia dari serat karbon yang didapatkan beberapa penelitian, ada beberapa penelitian yang mendapatkan hasil dan pembahasan yang berbeda dari beberapa penelitian lainnya. Pada hasil pengujian FTIR yang dilakukan oleh Wen, dkk (2019), tidak terdapat gugus fungsi yang mengandung Si pada permukaan serat karbon setelah di beri *sizing* SCA yang berbeda dengan hasil pengujian yang didapatkan oleh penelitian lainnya. Selain itu hanya terdapat *peak* O-H pada hasil pengujiannya, dimana *peak* O-H ini berasal dari reaksi kimia Si-O-R menjadi Si-OH. Pembahasan yang disajikan oleh Wen, dkk (2019) juga berbeda dengan teori yang seharusnya ada pada permukaan serat karbon, karena menurut Pape (2017) silanol (-Si-OH) tidaklah stabil, dan akan berkondensasi dengan cepat menjadi siloksan (-Si-O-Si-).

4.2.2 Morfologi Serat Karbon dan Komposit

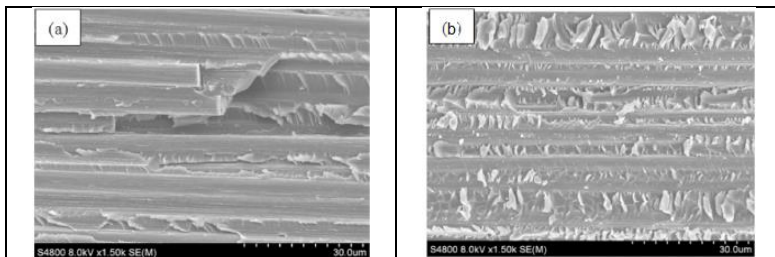
Penelitian yang dilakukan oleh Yu, dkk (2014) yaitu pengaruh *sizing treatment* menggunakan *silane coupling agent* (SCA) jenis epoksi silane pada serat karbon. Permukaan serat karbon yang diberi *sizing treatment* dengan SCA menjadi lebih kasar dibandingkan serat karbon tanpa perlakuan. Peningkatan

kekasaran pada permukaan serat karbon didukung oleh hasil penelitian Zheng, dkk (2016) yang menggunakan tiga jenis SCA yaitu metil silane (MS), amino silane (APS), dan epoksi silane (GPS). Selain itu, pada serat karbon tanpa perlakuan memiliki banyak tekstur alur sepanjang arah longitudinal serat akibat karbonisasi dari prekursor serat karbon. Namun, alur menjadi tidak terlihat setelah diberi *sizing* SCA karena pembentukan lapisan tipis oligomer *siloxane* pada permukaan serat karbon. Selain itu, tidak ada perbedaan dalam morfologi permukaan untuk ketiga jenis serat karbon yang diberi *sizing treatment* dengan SCA karena mekanisme reaksi yang sama pada serat. Morfologi serat karbon pada penelitian Jiang, dkk (2015) dengan *sizing* SCA jenis amino silane dan epoksi *sizing*, didapatkan permukaan serat karbon *desized* halus dengan tekstur beberapa alur sejajar dengan arah longitudinal serat karbon. Pembentukan lapisan tipis oligomer siloksan pada permukaan serat karbon diaktifkan oleh reaksi SCA terhidrolisis dan kelompok hidroksil pada serat karbon (Zheng, dkk, 2016; Jiang, dkk, 2015), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Serat karbon a) tanpa perlakuan b) *sizing* MS-SCA c) *sizing* APS-SCA d) *sizing* GPS-SCA (Zheng, dkk, 2016).

Morfologi komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* SCA pada hasil penelitian Yu, dkk (2019) didapatkan bahwa hasil patahan serat karbon dengan *sizing* SCA memiliki permukaan yang lebih kasar. Permukaan yang kasar disebabkan matriks epoksi yang masih melekat pada permukaan serat karbon, berbeda dengan permukaan serat karbon tanpa perlakuan yang memiliki permukaan yang halus. Wen, dkk (2019) juga mendapatkan bahwa pada komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan, terdapat *crack* pada *interface* antara serat dan matriks sepanjang arah longitudinal serat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 dengan perbesaran 1.500 kali. Selain itu beberapa monofilamen serat rusak. *Crack* pada *interface* antara serat karbon dan matriks sepanjang arah longitudinal serat juga mengindikasikan *interface* yang buruk karena matriks epoksi tidak dapat mengikat serat karbon sebagaimana fungsi dari matriks pada komposit (Sulistijono, 2012) yang mengindikasikan adhesi *interface* antara serat karbon dan resin epoksi benar-benar lemah. Setelah *sizing* dengan SCA, ikatan fisikokimia yang baik antara serat dan matriks menjadi lebih baik



Gambar 4.6 Fraktur komposit epoksi/serat karbon a) tanpa perlakuan b) dengan *sizing* SCA (Wen, dkk, 2019)

Untuk data-data yang disajikan oleh beberapa jurnal tersebut, terdapat perbedaan morfologi dari serat karbon yang dilakukan oleh Yu, dkk (2014) terkait peningkatan kekasaran pada permukaan serat karbon. Pada penelitian yang dilakukan Zheng, dkk (2016) dan Jiang, dkk (2015), hanya menyebutkan

bahwa lapisan SCA melapisi tekstur alur yang terdapat pada serat karbon tanpa perlakuan, sehingga alur tersebut menjadi tidak terlihat. Namun jika dilihat dari gambar hasil SEM ketiga jurnal tersebut, terlihat bahwa permukaan serat karbon dengan *sizing* SCA memiliki perbedaan yang jelas dan terlihat lebih kasar dibandingkan dengan permukaan serat karbon tanpa perlakuan. Selain dari hasil SEM, pengujian AFM (*Atomic Force Microscopy*) yang dilakukan Zheng, dkk (2016) mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang meningkat ketika diberi *sizing* SCA yaitu dari 120,6 nm menjadi 137.2 nm untuk MS-SCA, 127.4 nm untuk APS-SCA, dan 129.3 nm untuk GPS-SCA.

4.2.3 IFSS (*Interfacial Shear Strength*) dari Komposit

Pada penelitian *sizing treatment* menggunakan *silane coupling agent* (SCA) yang dilakukan oleh beberapa penelitian dengan menggunakan metode yang sama yaitu *microbond test* didapatkan bahwa SCA dapat meningkatkan nilai IFSS komposit epoksi/serat karbon, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil pengujian IFSS dengan *sizing* SCA

Referensi	Material <i>Sizing</i>	Sebelum (MPa)	Sesudah (MPa)	Kenaikan (%)
Yu, dkk (2014)	Epoksi silane	83,8 ±	96,0 ±	14,5
		11,1	17,8	
Zheng, dkk (2016)	Metil silane	58,15	72,09	24
	Amino silane	58,15	76,99	32
	Epoksi silane	58,15	79,09	36
Wen, dkk (2019)	Amino silane	40,72	58,03	42,5

Kenaikan nilai IFSS dikarenakan SCA pada permukaan serat karbon dapat menghasilkan peningkatan energi permukaan serat, yang bermanfaat untuk infiltrasi serat karbon oleh matriks. Gugus fungsi pada SCA juga dapat bereaksi dengan permukaan serat karbon serta matriks. Reaksi kimia ini dapat membentuk ikatan kimia berenergi tinggi dan mencegah kerusakan *interface*

dari komposit epoksi/serat karbon (Wen, dkk, 2019). SCA jenis metil silane dapat meningkatkan nilai IFSS karena gugus alkil pada metil silane yang berada pada permukaan serat karbon meningkatkan kompatibilitas dengan resin epoksi sehingga dapat meningkatkan ikatan *interface* antara serat dan matriks. Untuk serat karbon dengan SCA jenis amino silane, kenaikan nilai IFSS karena terjadinya ikatan silang dan reaksi *curing* antara gugus amino dalam amino silane dan epoksi yang selanjutnya dapat meningkatkan kekuatan ikatan *interface*. Untuk serat karbon dengan SCA jenis epoksi silane, kenaikan tertinggi nilai IFSS ini dikarenakan interaksi antara kelompok epoksi pada permukaan serat karbon dan matriks epoksi (Zheng, dkk, 2016). Hasil ini sesuai dengan teori yang disebutkan oleh Pape (2017) bahwa SCA jenis amino silane dan epoksi silane memang sering digunakan untuk resin termoset epoksi karena SCA lebih optimum jika kelompok organofungsional dapat berpartisipasi dalam mekanisme *curing* pada struktur polimer dalam pembentukan akhir komposit (Pape, 2017).

4.2.4 ILSS (*Interlaminar Shear Strength*) dari Komposit

Pengujian ILSS dilakukan oleh Wen, dkk (2019) yaitu dengan metode *3-point short beam strength test*. Nilai ILSS dari komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* SCA mengalami kenaikan 34% dibandingkan komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan yaitu dari 50,43 MPa menjadi 67,55 MPa. Nilai ILSS komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* SCA juga lebih tinggi dibandingkan komposit epoksi/serat karbon dengan perlakuan oksidasi. Kenaikan ILSS ini membuktikan bahwa peningkatan gugus fungsi yang mengandung oksigen, silikon, dan nitrogen dapat meningkatkan interaksi kimia antara matriks dan serat dan meningkatkan ikatan *interface* pada komposit epoksi/serat karbon. Gugus fungsi pada SCA dapat bereaksi dengan permukaan serat karbon serta matriks. Reaksi kimia ini dapat membentuk ikatan kimia berenergi tinggi dan mencegah kerusakan *interface* dari komposit epoksi/serat karbon. Selain itu,

meningkatnya kekasaran permukaan serat karbon juga dapat meningkatkan ikatan *interface* dari komposit epoksi/serat karbon karena adanya *interlocking* mekanik antara serat dan matriks.

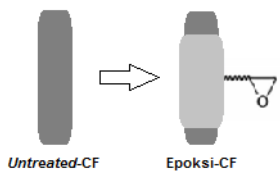
4.3 Epoksi

Epoksi menjadi salah satu bahan *sizing* yang paling umum untuk resin termoset karena stokiometrik dari epoksi. Selain itu epoksi juga merupakan material matriks yang sering digunakan (Gnadinger, Maddendorf, dan Fox, 2016). Seringkali *sizing* dispersi dari kelas kimia yang sama dengan matriks polimer digunakan untuk menjamin kompatibilitas kimia (Moosburger-Will, dkk, 2018). Material yang digunakan pada treatment ini yaitu seperti yang digunakan pada penelitian Fernandez, dkk (2014). Serat karbon yang digunakan yaitu serat karbon *woven* 51/49 *textile*, yang didapatkan dari Hexcel Composites (G-1501). Matriks resin *tetraglycidyl diamino diphenylmethane* (TGDDM) yang didapatkan dari Bakelite Ibérica (Rutapox VE 2895/LV). *Curing agent diamino diphenylmethane* (DDM) (Fluka quality). Untuk *sizing* yang digunakan yaitu TGDDM dan *diglycidylether of bisphenol-A* (DGEBA) yang didapatkan dari Dow Chemical (DER 332). Selain itu, pada penelitian Zhang (2015) digunakan penambahan *curing agent polyetheramine* EC310 yang didapatkan dari Baxxodur pada larutan *sizing*.

Sizing treatment dimulai dengan membersihkan serat karbon dengan diklorometana. Setelah itu, serat karbon dikeringkan dengan *vacuum oven* pada temperatur 100°C semalaman. Selanjutnya, serat karbon di rendam pada larutan *sizing* epoksi 0,7% di dalam diklorometana selama 30 menit dengan menggunakan *ultrasonic*. Setelah itu, serat karbon dikeringkan dengan *vacuum oven* pada temperatur 110°C selama 72 jam (Fernandez, dkk, 2004; Marieta, Schulz, dan Mondragon, 2002).

4.3.1 Karakteristik Kimia Serat Karbon

Penelitian *sizing treatment* dilakukan oleh Zhang (2015) dengan menggunakan epoksi *diglycidyl ether of bisphenol A* (DGEBA) dan menggunakan *curing agent polyetheramine* EC310. Pada serat karbon yang telah di *sized* dengan *sizing* epoksi, terdapat kelompok O-H yang dibentuk dari reaksi adisi epoksida-amina. Selain itu juga terdapat ikatan Ar-O-C dan C-N yang masing-masing berasal dari ikatan DGEBA dan *curing agent* EC310. Ma, dkk (2016) juga melakukan penelitian pengaruh beberapa *treatment* termasuk *sizing* epoksi pada serat karbon. Pada kandungan *sizing* epoksi yang digunakan pada serat karbon terdapat *peak* epoksida. Selain *peak* epoksida juga terdapat cincin benzena dan NH₂. *Sizing treatment* dengan epoksi dapat memunculkan keberadaan *peak* epoksida. Mekanisme pemberian *sizing* epoksi ditunjukkan pada Gambar 4.7. Sedangkan keberadaan *peak* epoksida pada hasil FTIR ditunjukkan pada Tabel 4.7. Pada hasil pengujian yang dilakukan oleh Zhang (2015), tidak terdapat *peak* epoksida yang dikarenakan keberadaan *curing agent* yang dapat membuka cincin epoksi melalui reaksi poliadisi antara resin dan *curing agent* (Petrie, 2006).



Gambar 4.7 Mekanisme *sizing treatment* dengan epoksi

Tabel 4.7 Hasil FTIR serat karbon dengan *sizing* epoksi

Ref.	Sebelum <i>Sizing</i>		Sesudah <i>Sizing</i>	
	Wave- Number (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi	Wave- Number (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
Zhang	-	-	3660	O-H

(2015)		2990, 2900	C-H
		1390	C-H
		1240	Ar-O-C
		1070	C-N
		3350	NH ₂
Ma, dkk		1510	Cincin Benzena
(2016)	-	1250	
		915	Epoksida
		830	

Ma, dkk (2016) juga melakukan pengujian XPS dari serat karbon dengan *sizing* epoksi dan mendapatkan bahwa terdapat senyawa epoksi yang mengandung gugus amina dan gugus hidroksil. Pada hasil penelitian Kafi, dkk (2014) didapatkan bahwa serat karbon tanpa perlakuan (*unoxidized*) memiliki karakteristik struktur grafitik C-C dengan *peak* tajam tinggi dan luas sekitar 284,5 eV. Pada spektrum C1s dari serat karbon dengan *sizing* epoksi memiliki *peak* karakteristik senyawa epoksi. Kecocokan yang baik dengan spektrum epoksi menunjukkan bahwa serat dilapisi dengan baik oleh lapisan *sizing* epoksi. Pada penelitian Jiang, dkk (2015) juga mendapatkan bahwa pada serat karbon dengan *sizing* epoksi, oksigen sebanyak 26,9% terdeteksi pada permukaan serat karbon dengan persentase 21,82% dari kelompok epoksi. Sementara setelah perlakuan *desizing*, kadar oksigen menurun menjadi 11,8% dan kadar karbon meningkat dari 71,6% menjadi 85,5%. Selain itu, persentase kelompok epoksi pada serat karbon *desized* berkurang menjadi 2,62%. Dari hasil pengujian XPS didapatkan bahwa kandungan oksigen pada permukaan serat karbon meningkat karena komposisi oksigen pada epoksi, namun untuk nitrogen mengalami penurunan. Hasil pengujian XPS ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil pengujian XPS dengan *sizing* epoksi

Referensi	<i>Sizing</i>	O/C	N/C	Si/C
Jiang dkk	Epoksi	0,376	0,021	-
(2015)	<i>Desized</i>	0,138	0,032	-

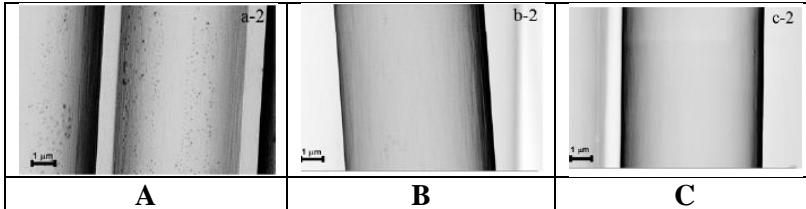
Kafi, dkk (2014)	<i>Untreated</i> Epoksi	0,006 0,209	0,016 0,006	0,002 0,001
---------------------	----------------------------	----------------	----------------	----------------

Dari data karakteristik kimia dari serat karbon yang diberikan oleh Zhang (2015) hasil FTIR tidak terdapat gugus fungsi epoksida tidak seperti penelitian lainnya dan tidak dijelaskan terkait masing-masing *peak* dan mengapa tidak ada *peak* epoksida, namun ini sesuai dengan teori yang ada terkait mekanisme *curing* dari epoksi yaitu dikarenakan penggunaan *curing agent* pada larutan *sizing* epoksi yang dapat membuka cincin epoksi (Ratna, 2009) sehingga tidak terdapat *peak* epoksida pada hasil FTIR. Selain itu pada hasil FTIR yang ditunjukkan Ma, dkk (2016) tidak dijelaskan mengenai hasil FTIR namun dari gambar hasil FTIR dapat dilihat bahwa terdapat *peak* epoksida, cincin benzena, dan NH₂.

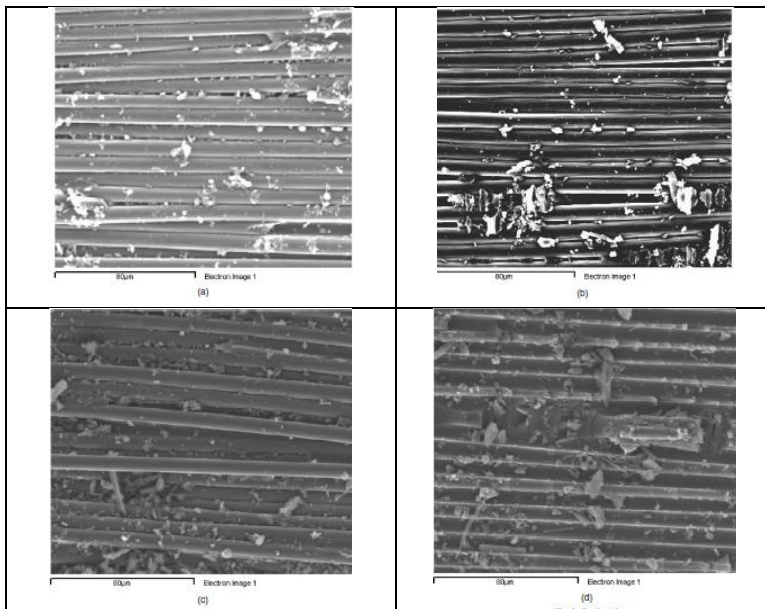
4.3.2 Morfologi Serat Karbon dan Komposit

Sizing treatment dilakukan oleh Zhang (2015) dengan menggunakan epoksi DGEBA dan *curing agent*. Morfologi dari serat karbon dengan *sizing* epoksi yaitu terdapat butir-butir polimer pada permukaan serat karbon. Tekstur alur di sepanjang arah longitudinal serat karbon menjadi tidak terlihat setelah dilapisi dengan *sizing* epoksi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Selain itu perbedaan konsentrasi dari *sizing* epoksi juga diamati dalam penelitian ini, yaitu semakin tinggi konsentrasi *sizing* akan meningkatkan ketebalan lapisan *sizing* epoksi pada permukaan serat karbon. Kafi, dkk (2014) mendapatkan hasil pengujian morfologi dari serat karbon tanpa perlakuan dan dengan *sizing* epoksi tidak terlihat banyak perbedaan. Pada serat karbon dengan *sizing* epoksi, terdapat beberapa lapisan atau *patch* yang tidak teratur pada permukaan serat yang menunjukkan bahwa permukaan dilapisi dengan ketebalan yang tidak seragam. Pada penelitian Gnadinger, Middendorf, dan Fox (2016) didapatkan serat karbon tanpa perlakuan memiliki permukaan yang halus, sedangkan serat

karbon dengan *sizing* epoksi terdapat keretakan dan cacat halus pada lapisan *sizing*.



Gambar 4.8 Serat karbon a) dengan *sizing* komersil b) *desized* c) dengan *sizing* epoksi (Zhang, 2015)



Gambar 4.9 Komposit a) CC b) CW c) CT d) CD (Fernandez, dkk, 2004)

Fernandez, dkk (2004) melakukan penelitian *sizing treatment* dengan dua jenis epoksi, yaitu dengan

tetraglycidyl-diaminodiphenylmethane (TGDDM) dengan kode spesimen CT dan *diglycidylether of bisphenol-A* (DGEBA) dengan kode spesimen CD. Selain itu, kedua *sizing* tersebut dibandingkan dengan serat karbon tanpa perlakuan yaitu dengan kode CC, dan serat karbon *desized* yaitu dengan kode CW. Pemberian *sizing* epoksi pada serat karbon dapat meningkatkan ikatan *interface* antara serat dan matriks, karena morfologi hasil patahan dari komposit masih terdapat resin yang melekat pada permukaan serat setelah fraktur. Pada serat karbon *desized* atau tanpa perlakuan morfologi komposit seperti mengalami *debonding* antara serat dan matriks, sehingga patahan serat karbon terlihat halus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Dalam kasus komposit *sizing* epoksi, dimana sebagian besar serat ditutupi dengan matriks, kegagalan kohesif dalam matriks juga dapat terjadi sebagai konsekuensi dari adhesi *interface* yang lebih baik (Fernandez, dkk, 2004).

Dari data-data yang diberikan terkait morfologi serat karbon dan komposit epoksi/serat karbon, terdapat perbedaan yang didapatkan oleh Gnadinger, Maddindorf dan Fox (2016), dibandingkan penelitian lainnya yang mendapatkan bahwa terdapat *patch* atau butiran lapisan epoksi pada permukaan serat karbon, Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016) mendapatkan serat karbon dengan *sizing* epoksi terdapat keretakan dan cacat halus pada lapisan *sizing*, dan tidak ada penjelasan penyebab terdapatnya keretakan dan cacat halus ini. Selain itu untuk mengetahui peningkatan kekasaran, Kafi, dkk (2014) melaporkan bahwa pemberian *sizing* epoksi mengalami penurunan yaitu dari 37 nm menjadi 33 nm. Selain itu Fernandez, dkk (2004) juga mendapatkan penurunan pada kekasaran yaitu dari 40,5 nm menjadi 34,3 nm dengan TGDDM dan 33,9 nm dengan DGEBA. Namun, pada pengujian yang dilakukan Zhang (2015) didapatkan peningkatan kekasaran yaitu dari 9,5 nm menjadi 24,9 nm.

4.3.3 IFSS (*Interfacial Shear Strength*) pada Komposit

Pada penelitian *sizing treatment* menggunakan epoksi yang dilakukan oleh Zhang (2015), perubahan *sizing* epoksi serat karbon memunculkan berbagai variasi peningkatan IFSS. Kenaikan nilai IFSS dapat dikaitkan dengan peningkatan kekasaran permukaan dan kompatibilitas kimia yang lebih baik dengan matriks. Pengujian IFSS dilakukan dengan menggunakan metode *single fiber fragmentation test*. Nilai IFSS terbesar didapatkan dengan rasio resin dan *hardener* 100:94,7 dengan kenaikan 157% karena struktur cincin yang saling berhubungan dari *sizing* epoksi dapat melekat erat pada permukaan serat. Selain itu, gugus amina yang berlebih dapat bereaksi dengan gugus epoksi dalam resin matriks, yang menghasilkan sifat *interface* yang paling kuat dan peningkatan IFSS terbesar.

Selain pengaruh dari komposisi *sizing*, konsentrasi *sizing* pada serat karbon terhadap komposit epoksi/serat karbon juga diteliti. Nilai IFSS mengalami kenaikan seiring bertambahnya konsentrasi *sizing* epoksi dengan peningkatan tertinggi sebesar 157%. Pada konsentrasi 4% mengalami penurunan dibandingkan konsentrasi *sizing* 2%. Dari morfologi serat karbon pada konsentrasi *sizing* 4% dapat dilihat bahwa terlalu banyak konsentrasi *sizing* membuat permukaan serat menjadi kurang seragam. Konsentrasi ini juga membuat lapisan *sizing* dapat terlepas di beberapa tempat pada permukaan serat yang dapat mempengaruhi penetrasi resin matriks ke dalam ukuran epoksi dan pembentukan *interface* antara serat dan matriks.

Selain itu pengujian IFSS juga dilakukan oleh Gnadinger, Maddendorf, dan Fox (2016) dengan metode yang sama dengan perbedaan temperatur *curing*. Pada penelitian ini didapatkan bahwa perbedaan temperatur *curing* tidak memberikan efek yang signifikan terhadap nilai IFSS.

Drzal dan Madhukar (1993) mendapatkan kenaikan sebesar 118% dengan pemberian perlakuan *electrochemical oxidation* dan *sizing* epoksi. Peningkatan tingkat adhesi tersebut disebabkan

oleh transfer stres yang lebih baik antara serat dan matriks. Nilai IFSS dari masing-masing penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil pengujian IFSS.

Referensi		Sebelum <i>Sizing</i> (MPa)	Sesudah <i>Sizing</i> (MPa)	Kenaikan (%)
Zhang (2015)	Rasio 100:0	34,2	59,7	74
	Rasio 100:23,7	34,2	56,9	66
	Rasio 100:47,3	34,2	53,8	57
	Rasio 100:94,7	34,2	87,9	167
	Rasio 100:110	34,2	68,1	99
	Konsentrasi (0,5%)	34,2	66,4	94
	Konsentrasi (1%)	34,2	79,1	131
	Konsentrasi (2%)	34,2	87,9	167
	Konsentrasi (4%)	34,2	57,4	67
	Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016)	Temp. <i>Curing</i> 23°C	23	62
Temp. <i>curing</i> 90°C		22	64	191
Drzal dan Madhukar (1993)	<i>Electrochemical Oxidation</i>	37,2	68,3	83
	<i>Sizing</i> Epoksi	68,3	81,4	19

Untuk data IFSS yang disajikan dari kedua penelitian ini menyebutkan bahwa penggunaan epoksi sebagai material *sizing treatment* meningkatkan nilai IFSS, dan peningkatan yang didapatkan dari kedua jurnal tersebut memiliki angka yang hampir sama dan sangat besar, yaitu 167% yang didapatkan Zhang (2015) dan 169% dan 191% yang didapatkan oleh Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016). Namun didapatkan kenaikan sebesar 19% pada penelitian Drzal dan Madhukar (1993) yang memberi *sizing* epoksi pada serat karbon setelah diberi perlakuan *electrochemical oxidation*.

4.3.4 ILSS (*Interlaminar Shear Strength*) pada Komposit

Fernandez, dkk (2004) melakukan penelitian *sizing treatment* dengan dua jenis epoksi, yaitu dengan *tetraglycidylidiaminodiphenylmethane* (TGDDM) dengan kode spesimen CT dan *diglycidylether of bisphenol-A* (DGEBA) dengan kode spesimen CD. Kedua *sizing* tersebut akan dibandingkan dengan serat karbon tanpa perlakuan yaitu dengan kode CC, dan serat karbon *desized* yaitu dengan kode CW. Pada pengujian ILSS yaitu dengan metode *3-point short beam strength test*, didapatkan komposit dengan serat CT dan CD mengalami kenaikan yaitu sekitar 50-60 MPa dibandingkan komposit dengan serat CC dan CW yang memiliki nilai ILSS dibawah 50 MPa. Pengujian ILSS juga dilakukan Kafi, dkk (2014) yaitu dengan metode yang sama, didapatkan nilai ILSS dari komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* epoksi mengalami kenaikan 70% dibandingkan komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan yaitu dari $34 \pm 4,4$ MPa menjadi $58 \pm 2,5$ MPa. Selain itu, Ma, dkk (2016) juga mendapatkan nilai ILSS sebesar 67,67 MPa.

Data ILSS yang diberikan oleh kedua jurnal tersebut mengalami kenaikan. Kenaikan dari nilai ILSS yang dilakukan oleh kedua penelitian tersebut dapat dikaitkan dengan kompatibilitas kimia antara epoksi pada permukaan serat karbon dan epoksi pada resin matriks yang lebih baik. Material *sizing* yang sesuai dengan matriksnya dapat meningkatkan *wettability* serat oleh matriks (Zhang, 2015).

4.4 Poliuretan

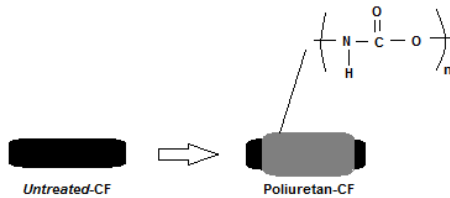
Poliuretan termasuk material *sizing* yang umum digunakan, sama seperti epoksi. Namun, sistem matriks poliuretan termoset merupakan perkembangan yang relatif baru (Gnadinger, Maddindorf, dan Fox, 2016). Poliuretan sering digunakan sebagai *adhesive* karena daya rekat yang baik dan sifat luar biasa lainnya yang memungkinkan *adhesive* poliuretan untuk digunakan secara luas dalam beberapa aplikasi (Somarathna, dkk, 2018). Material yang digunakan pada *sizing* dengan poliuretan yaitu seperti yang

digunakan pada penelitian Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016). Serat karbon yang digunakan yaitu serat karbon eksperimental yang di produksi oleh BlueStar 0.77dTex 24k dengan prekursor PAN. *Sizing* poliuretan yang digunakan yaitu *Hydrosize* U6-01 yang didapatkan dari Michelman, USA. Matriks epoksi yang digunakan yaitu resin epoksi Sika Biresin CR131 (50-100% *bisphenol A diglycidyl ether* (DGEBA), 10-20% *bisphenol F diglycidyl ether* (DGEBF) dan 5-10% 1,4-bis(2,3-*epoxypropoxy*) butane) dan *hardener triethyleneteramine* (TETA) CH135-4. Selain itu, pada penelitian yang dilakukan oleh Andideh dan Esfandeh (2017) yang menggunakan *hyperbranched* poliuretan menggunakan *Isophoronedisocyanate* (IPDI), *diethanolamine* (DEOA), *diethylenetriamine* (DETA), *ethylene bis(chloroformate)*, dan *N-Methyl-2-pyrrolidone* (NMP) yang didapatkan dari Sigma-Aldrich, USA.

Sizing treatment dimulai dengan membuat larutan *sizing* dengan melarutkan larutan *sizing* poliuretan berbasis air dengan konten *sizing* 1,0% dengan *acetone*. Setelah itu serat karbon dicelupkan ke dalam larutan *sizing* dan air dengan perbandingan 1:10. Selanjutnya serat karbon dikeringkan pada temperatur sekitar 140-160°C selama 3 menit (Gnadinger, Maddindorf, dan Fox, 2016).

4.4.1 Karakteristik Kimia Serat Karbon

Zhang, dkk (2018) melakukan penelitian *sizing* dengan poliuretan pada permukaan serat karbon. Hasil FTIR menunjukkan perbedaan yang jelas dari serat karbon tanpa perlakuan dan serat karbon dengan *sizing treatment* yaitu C=O *stretching* dan N-H *deformation*. Dua *peak* ini adalah *peak* penyerapan karbamat yang khas yang menunjukkan bahwa *sizing* poliuretan terikat dan diserap secara kimiawi ke permukaan serat karbon (Zhang, dkk, 2018). Keberadaan beberapa *peak* tersebut dikaitkan dengan uretan (-NHCOO-) dan merupakan bagian yang paling reaktif dalam poliuretan (Reghunadhan dan Thomas, 2017) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Mekanisme *sizing treatment* dengan poliuretan

Karakteristik kimia pada hasil penelitian Dilsiz dan Wightman (2000) dengan pengujian XPS, didapatkan gugus karbonil dan karboksil tidak mengalami perubahan yang signifikan, namun gugus hidroksil mengalami penurunan dari 20,1% menjadi 10,4%. Penurunan ini mungkin dikarenakan karbon yang mengikat nitrogen dari poliuretan (Reghunadhan dan Thomas, 2017). Hasil tersebut juga di dukung oleh hasil penelitian Zhang, dkk (2018) yang mendapatkan peningkatan presentase ikatan C-N, yang juga meningkatkan konsentrasi dari oksigen dan nitrogen. Selain itu, didapatkan bahwa peningkatan konsentrasi dari *sizing* poliuretan dapat meningkatkan presentase oksigen pada permukaan serat karbon. Hasil penelitian Andideh dan Esfandeh (2017) juga mendukung hasil penelitian sebelumnya yaitu *sizing* dengan poliuretan dapat meningkatkan konsentrasi dari oksigen dan nitrogen. Untuk serat karbon tanpa perlakuan hanya memiliki elemen C dan O yaitu terdapat C-O dan C=O karena pada proses akhir karbonisasi C-C struktur grafit tidak terbentuk sempurna begitu pula dengan kemungkinan keberadaan nitrogen. Pada serat karbon dengan *sizing* poliuretan terdapat *peak* lemah yaitu karbamat (NCOO) dan urea (N₂CO) pada sekitar 289,0 eV. Hasil pengujian XPS ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Pengujian XPS dengan *sizing* poliuretan

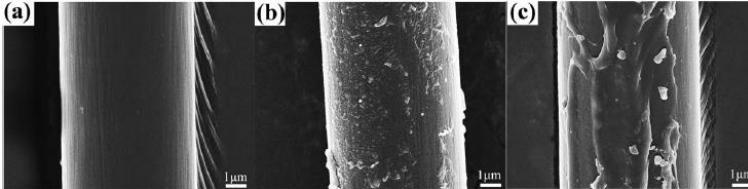
Ref.	Perlakuan	C	O	N	Si	Na
Dilsiz dan	<i>Untreated</i>	91,2	6,19	1,24	-	1,35
Wightman	<i>Sized</i>	76,1	20,6	2,4	-	0,9

(2000)							
Andideh dan Esfandeh (2017)	<i>Untreated</i>	94,6	5,4	-	-	-	
	<i>Sized</i>	74,3	20,6	5,4	-	-	
	<i>Untreated</i>	79,14	17,65	1,14	2,07	-	
	<i>Sized (0,2%)</i>	78,62	18,09	1,99	1,31	-	
	<i>Sized (0,4%)</i>	77,71	18,18	3,08	1,03	-	
Zhang, dkk (2018)	<i>Sized (0,6%)</i>	77,66	18,27	3,22	0,84	-	
	<i>Sized (0,8%)</i>	76,65	18,07	4,11	1,17	-	
	<i>Sized (1,0%)</i>	76,6	18,67	2,76	1,98	-	
	<i>Sized (1,2%)</i>	76,03	18,68	4,28	1,01	-	

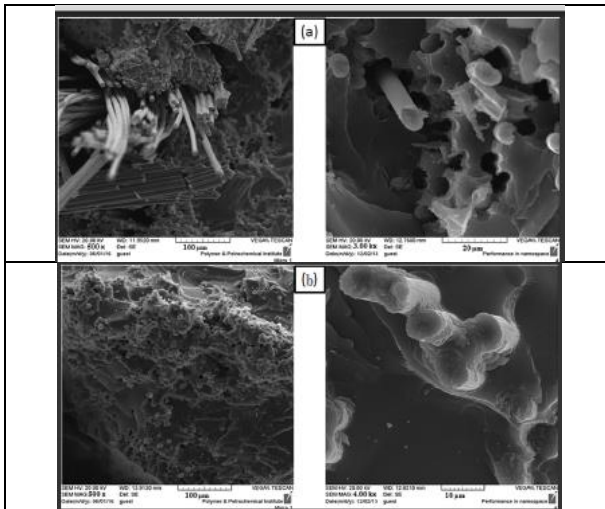
4.4.2 Morfologi Serat Karbon dan Komposit

Zhang, dkk (2018) melakukan penelitian dengan *sizing treatment* pada serat karbon menggunakan poliuretan. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa konsentrasi *sizing* yang berbeda yaitu 0,4% dan 1%. Pada serat karbon tanpa perlakuan memiliki permukaan serat yang relatif halus. Permukaan serat karbon tanpa perlakuan juga memiliki beberapa tekstur alur yang jelas yang didistribusikan sejajar dengan arah longitudinal serat karbon akibat prekursor dari serat karbon. Setelah *sizing*, terlihat lapisan tipis polimer melekat pada permukaan serat karbon. Tekstur alur pada serat karbon juga menghilang, karena molekul poliuretan yang menumpuk dan membentuk lapisan tipis pada permukaan serat. Semakin bertambahnya konsentrasi dari *sizing* akan meningkatkan ketebalan dari lapisan poliuretan pada permukaan serat karbon, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Hasil penelitian tersebut juga didukung oleh hasil penelitian Gnadinger, Middendorf, dan Fox (2016) dan Andideh dan Esfandeh (2017) yaitu pada serat karbon dengan *sizing* poliuretan, tekstur alur pada serat tidak terlihat dan permukaannya menjadi lebih halus. Pada penelitian Andideh dan Esfandeh juga didapatkan bahwa *sizing* poliuretan dapat meningkatkan kekasaran permukaan serat karbon. *Sizing* poliuretan yang terdistribusi merata di berbagai arah pada permukaan serat karbon membuat permukaan serat

karbon menjadi lebih kasar, yang dapat menyebabkan *interlocking* mekanik antara serat dan matriks.



Gambar 4.11 Serat karbon a) *unsized* b) 0,4% poliuretan *sizing* c) 1% poliuretan *sizing* (Zhang, dkk, 2018).



Gambar 4.12 Komposit epoksi/serat karbon a) tanpa perlakuan b) *sizing* dengan *hyperbranched* poliuretan (Andideh dan Esfandeh, 2017).

Pada hasil penelitian Andideh dan Esfandeh (2018), didapatkan morfologi pada komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan terlihat jelas mengalami *pull-out*. Selain itu, terdapat banyak rongga disekitar serat. Pada serat karbon dengan *sizing* poliuretan, rongga antara serat dan matriks berkurang dan

memiliki *interface* yang mulus, yang mengindikasikan *interface* yang baik antara serat karbon dan matriks, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Selain itu permukaan serat karbon juga terlihat kasar karena matriks epoksi yang masih melekat di permukaan serat karbon.

Pada data morfologi serat karbon yang diberikan, Gnadinger, Maddendorf, dan Fox (2016) mendapatkan permukaan serat karbon setelah diberi *sizing* poliuretan menjadi lebih halus karena tekstur alur yang sebelumnya terdapat pada serat karbon tanpa perlakuan menjadi tidak terlihat. Hasil tersebut berbeda dengan hasil morfologi dari jurnal lainnya yang mengatakan serat karbon dengan *sizing* poliuretan dapat meningkatkan kekasaran yang membuat tekstur alur pada serat karbon tanpa perlakuan tidak terlihat. Zhang, dkk (2018) juga tidak menyebutkan bahwa *sizing* dengan poliuretan dapat meningkatkan kekasaran, namun dari hasil morfologi serat karbon dapat dilihat bahwa permukaan menjadi lebih kasar. Hasil pengujian AFM juga mendukung pernyataan bahwa *sizing* poliuretan dapat meningkatkan kekasaran yaitu dari 73,3 nm menjadi 77,4 nm dengan konsentrasi *sizing* 0,4% dan 85,7 nm dengan konsentrasi *sizing* 1,0%.

4.4.3 IFSS (*Interfacial Shear Strength*)

Gnadinger, Middendorf, dan Fox (2016) melakukan pengujian IFSS dengan metode *single fiber fragmentation test* dengan perbedaan temperatur curing. Nilai IFSS mengalami kenaikan pada serat karbon dengan *sizing* poliuretan. Perbedaan temperatur *curing* tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada komposit. Kenaikan ini dikarenakan bertambahnya gugus fungsi pada permukaan serat karbon, selain itu meningkatnya kekasaran permukaan serat juga dapat meningkatkan ikatan *interface* dengan adanya *interlocking* mekanik. Dilsiz dan Wightman (2000) juga melakukan penelitian *sizing treatment* dengan menggunakan poliuretan. Namun, komposit epoksi/serat karbon-poliuretan mengalami penurunan nilai IFSS dibandingkan komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan. Ini disebabkan karena *sizing*

diadsorpsi ke permukaan serat. Adsorpsi *sizing* dapat mengurangi reaktivitas serat ke matriks karena gugus fungsional reaktif pada permukaan serat dan dalam *sizing* terlibat dalam proses adsorpsi dan karenanya tidak tersedia untuk reaksi dengan matriks. Adsorpsi *sizing* tersebut yang menyebabkan *interface* yang lemah antara serat dan matriks. Hasil IFSS ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Pada data yang diberikan mengenai nilai IFSS dari komposit, Dilsiz dan Wightman (2000) mendapatkan bahwa nilai IFSS menurun yang berbeda dengan yang dihasilkan oleh Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016) yang mengalami kenaikan yang cukup besar. Selain itu pada nilai ILSS yang didapatkan oleh Andideh dan Esfandeh (2017) yang akan diperjelas pada sub bab selanjutnya didapatkan kenaikan nilai ILSS yang mengindikasikan bahwa *sizing* dengan poliuretan dapat meningkatkan ikatan *interface* yang seharusnya nilai IFSS komposit menjadi lebih tinggi.

Tabel 4.11 Hasil Pengujian IFSS komposit dengan *sizing* poliuretan

Referensi	Temp. Curing (°C)	Sebelum Sizing (MPa)	Sesudah Sizing (MPa)	Kenaikan (%)
Dilsiz dan Wightman (2000)	-	28,0 ± 6	13,5 ± 2	-
Gnadinger, Maddindorf, dan Fox (2016)	90	23	59	156
	23	22	59	168

4.4.4 ILSS (*Interlaminar Shear Strength*)

Hasil pengujian ILSS dilakukan oleh Andideh dan Esfandeh (2017) dengan metode *3-point short beam strength test*. Nilai ILSS dari komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* poliuretan mengalami kenaikan 44% dibandingkan komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan yaitu dari 61,7 ± 1,3 MPa

menjadi $88,6 \pm 3,9$ MPa. Kenaikan dikarenakan bertambahnya gugus fungsi yang mengandung oksigen dan nitrogen pada permukaan serat karbon. Gugus fungsi ini dapat berikatan dengan matriks yang akan meningkatkan ikatan *interface* antara serat dan matriks. Selain itu hasil SEM permukaan komposit epoksi/serat karbon dengan pola patahan hasil dari pengujian ILSS juga menunjukkan bahwa komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* poliuretan memiliki *interface* yang jauh lebih baik dibandingkan komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan.

Data kenaikan ILSS yang didapatkan oleh Andideh dan Esfandeh (2017) sesuai dengan teori yang didapatkan dari kenaikan gugus fungsi oksigen dan nitrogen, dan peningkatan kekasaran pada permukaan serat karbon yang dapat meningkatkan ikatan *interface* dari serat dan matriks.

4.5 Poliimida

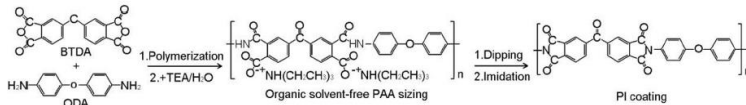
Poliimida mulai digunakan sebagai material *sizing* karena keunggulannya yaitu tahan terhadap temperatur tinggi dibandingkan dengan beberapa material *sizing* lainnya. Penggunaan poliimida banyak digunakan pada aplikasi temperatur tinggi (Hassan, dkk, 2019). Material yang digunakan yaitu seperti yang ditunjukkan pada penelitian He, dkk (2011). Serat karbon yang digunakan yaitu T-300 yang didapatkan dari Toray Industries Inc., Jepang. *Pyromellitic dianhydride* (PMDA), *4,4'-oxydianiline* (ODA), *N,N-dimethylacetamide* (DMAC), *triethylamine* (TEA) dan metanol yang didapatkan dari Sinopharm Chemical Reagent Co. Ltd., Cina. Sedangkan pada penelitian Yuan, dkk (2015) menggunakan *3,3',4,4'-benzophenonetetracarboxylic dianhydride* (BTDA) dan *4,4'-oxydianiline* (ODA) untuk membuat poliimida yang didapat dari Shanghai Civi Chemical Technology Co., Ltd.

Sizing treatment dimulai dengan mencampurkan dianhidrida dan diamina, setelah itu larutan di aduk selama 2 jam pada temperatur 15°C dibawah nitrogen hingga didapatkan larutan *polyamic acid* (PAA). Setelah itu larutan dipanaskan

dengan *vacuum* pada temperatur 80°C untuk mendapatkan polimer PAA dalam kondisi solid. Menambahkan 17 ml *triethylamine* (TEA) pada 2,6 L air deionisasi untuk menyiapkan larutan *aqueous* TEA. Setelah itu PAA solid dimasukkan ke larutan *aqueous* TEA sambil diaduk selama 2 jam pada temperatur ruang hingga didapatkan *sizing* PAA dengan konsentrasi 1%. Memasukkan serat karbon pada larutan *sizing* PAA selama 30 menit, lalu dipanaskan pada temperatur 100, 200, dan 300°C masing-masing selama 1 jam di nitrogen hingga terbentuk lapisan poliimida (Yuan, dkk, 2015).

4.5.1 Karakteristik Kimia Serat Karbon

Pada penelitian He, dkk (2011) ketika serat karbon dengan lapisan PAA dipanaskan pada 280°C, asam PAA berubah menjadi poliimida. Spektrum FTIR dari serat karbon berlapis poliimida terdapat imida karbonil (C=O), kelompok imida (–CONCO, C=O *stretching* simetris) dan N-C *stretching*, sedangkan *peak* N-H menghilang. Hasil penelitian tersebut juga didukung oleh Yuan, dkk (2015) yang mendapatkan *peak* tajam yaitu cincin benzena, asimetris dan simetris C=O *stretching* dari kelompok imida, C-N *stretching*, dan C=O *bending*. Tidak terdapat *peak* pada N-H yang mengindikasikan PAA telah berubah total menjadi poliimida. Selain itu, Hassan, dkk (2019) juga mendapatkan pada serat karbon dengan *sizing* poliimida terdapat *peak* asimetris dan simetris C=O dari kelompok imida. Selain itu juga terdapat *peak* C-N *stretching* dan *bending*. Hasil pengujian FTIR dengan *sizing* poliimida ditunjukkan pada Tabel 4.12.



Gambar 4.13 Mekanisme reaksi pembentukan poliimida (Yuan, dkk, 2015).

Tabel 4.12 Hasil FTIR serat karbon dengan *sizing* poliimida

Ref.	Perlakuan	Wave-number (cm ⁻¹)	Gugus Fungsi
He, dkk (2011)	<i>Sizing</i> PAA	1722	C=O
		1660	Imida I
		1546	Imidia II (N-H)
	<i>Sizing</i> poliimida	1776, 723	C=O
		1727	-CONCO, C=O simetris
		1380	N-C
		3433	O-H
Yuan, dkk (2015)	<i>Untreated</i>	1660	C=O
		1100	C-O
	<i>Sizing</i> poliimida	1499	Cincin benzena
		1780	C=O asimetris
		1720	C=O simetris
		1383	C-N
		733	C=O
Hassan, dkk (2018)	<i>Sizing</i> poliimida	1778	C=O asimetris
		1720	C=O simetris
		1372, 716	C-N

Pada hasil XPS He, dkk (2011) terdapat *peak* N1s yang muncul setelah serat karbon diberi *sizing* poliimida. Pada spektra C1s, *peak* pada 284,8 eV dikaitkan dengan atom karbon dari dua cincin benzena dari struktur ODA. *Peak* pada 285,6 eV yaitu dari cincin benzena PMDA dan struktur ODA. Selain itu juga N-C, yang mengalami pergeseran sekitar 0,8 eV karena efek dari kelompok imida yang berdekatan. Sedangkan hasil pengujian XPS Hassan, dkk (2018) didapatkan rasio O/C dari serat karbon dengan *sizing* poliimida adalah 0,15. Hasil pengujian XPS ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil XPS serat karbon dengan *sizing* poliimida

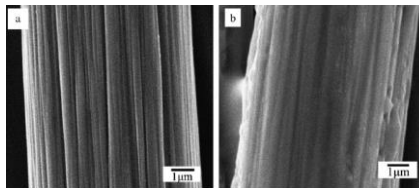
Referensi		Peak (eV)	Gugus Fungsi
He, dkk (2011)	C1s	284,8	Cincin benzena
		285,6	Cincin benzena, N-C

		286,3	C-O
		288,6	C=O
	O1s	532,1	C=O
		533,1	C-O-C
	N1s	400,9	-N(CO ₂)
Hassan, dkk (2018)		284,8	C-C
	C1s	285,5	C-OH
		286,6	C=O
		289,4	COOH

Dari data yang diberikan beberapa penelitian, pada penelitian He, dkk (2011) terdapat *peak* N1s pada hasil pengujian XPS yang mengindikasikan bahwa terdapat poliimida, namun pada penelitian tersebut tidak diberikan data pasti berapa presentasi dari masing-masing elemen. Selain itu, tidak diketahui pengaruh dari *sizing* dengan poliimida karena hanya terdapat gambar spektra *widescan* dari serat karbon sebelum dan sesudah diberi *sizing treatment*, namun garis tersebut tinggi nya hampir sama sehingga sulit untuk menyimpulkan pengaruh poliimida dari hasil pengujian XPS tersebut. Pada pengujian XPS yang dilakukan oleh Hassan, dkk (2019) tidak menyebutkan terdapatnya *peak* N1s pada pembahasan dan juga gambar spektra *widescan* yang diberikan, berbeda dengan hasil FTIR yang menyebutkan bahwa C-N merupakan indikasi keberadaan poliimida dan juga hasil XPS dari He, dkk (2011). Walaupun jika dilihat dari spektra tersebut ada garis kecil di tempat yang seharusnya *peak* N1s berada namun tidak bisa dipastikan keberadaan *peak* N1s. Selain itu, didapatkan bahwa O/C dari serat karbon dengan *sizing* poliimida adalah 0,15, namun tidak terdapat rasio O/C pada serat karbon tanpa perlakuan sehingga sulit untuk membandingkan dan memberi kesimpulan terkait pengaruh *sizing* dengan poliimida terhadap ikatan *interface* pada serat dan matriks.

4.5.2 Morfologi Serat Karbon

He, dkk (2011) melakukan penelitian terkait pelapisan serat karbon dengan menggunakan poliimida. Morfologi dari serat karbon tanpa perlakuan terdapat beberapa retakan dan cacat. *Sizing* dengan poliimida membuat permukaan serat karbon dilapisi dengan lapisan poliimida yang kontinu dan seragam tetapi tidak terlalu halus. Dibandingkan dengan serat karbon tanpa perlakuan, tekstur alur sepanjang arah longitudinal ini sebagian besar telah hilang dan menjadi buram dan kasar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Hasil tersebut juga didukung oleh hasil penelitian Yuan, dkk (2015), setelah diberi *sizing* dengan poliimida, kedalaman tekstur alur tersebut menjadi sangat dangkal. Tidak ada cacat permukaan yang signifikan pada permukaan serat karbon yang dilapisi poliimida dan lapisan poliimida terlihat kontinu dan seragam pada permukaan serat karbon. Hassan, dkk (2019) juga mendapatkan morfologi dari serat karbon yang telah di beri *sizing* poliimida masih memiliki beberapa alur di sepanjang arah longitudinal pada permukaan serat karbon.



Gambar 4.14 Serat karbon a) sebelum *sizing* dengan poliimida
b) sesudah *sizing* dengan poliimida (He, dkk, 2011)

Pada ketiga penelitian tersebut mendapatkan hasil yang sama terkait morfologi serat karbon setelah diberi *sizing* dengan poliimida, namun pada penelitian Hassan, dkk (2019) tidak terdapat morfologi serat karbon tanpa perlakuan sehingga sulit untuk membandingkan dan memberi kesimpulan terkait pengaruh *sizing* dengan poliimida terhadap morfologi serat karbon. Untuk morfologi dari komposit epoksi/serat karbon, belum ada publikasi

terkait pengaruh *sizing* poliimida terhadap komposit epoksi/serat karbon.

4.6 Analisis Tinjauan Pengaruh *Sizing Treatment*

4.6.1 Karakteristik Kimia Serat Karbon

Karakteristik kimia dari pengaruh *sizing treatment* pada serat karbon dilakukan dengan melakukan pengujian FTIR dan XPS. Pada beberapa penelitian terkait pengaruh *sizing treatment* pada serat karbon, didapatkan beberapa material *sizing* dapat meningkatkan gugus fungsi pada permukaan serat karbon. Pada serat karbon tanpa perlakuan hanya terdapat beberapa *peak* yang lemah. Pada beberapa penelitian juga didapatkan bahwa *peak* pada serat karbon tanpa perlakuan tidak terlihat dengan jelas. Namun, setelah di beri *sizing treatment* terdapat beberapa *peak* yang muncul pada spektra FTIR. Pada *sizing treatment* dengan *polydopamine* (PDA) terdapat *peak* baru yang muncul yaitu N-H dimana *peak* ini mengindikasikan keberadaan PDA pada permukaan serat karbon, selain itu juga terdapat *peak* O-H yang berasal dari katekol pada PDA. Pada *sizing treatment* dengan *silane coupling agent* (SCA) terdapat *peak* Si-O-Si yang mengindikasikan keberadaan lapisan polisiloksan pada permukaan serat karbon, selain itu juga *peak* Si-O-C yang mengindikasikan terjadinya rekasi kondensasi antara SCA dan serat karbon pada permukaan serat. Pada *sizing treatment* dengan epoksi, terdapat *peak* kelompok epoksida pada permukaan serat karbon. Pada *sizing treatment* dengan poliuretan terdapat *peak* karbamat pada permukaan serat karbon. Pada *sizing treatment* dengan poliimida ditandai dengan terdapatnya *peak* asimetris dan simetris C=O, terdapat C-N, dan hilangnya *peak* N-H pada permukaan serat karbon yang mengindikasikan *polyamic acid* (PAA) telah berubah menjadi poliimida. Pada hasil uji XPS didapatkan bahwa *sizing treatment* dengan beberapa material yang digunakan dapat meningkatkan rasio dari O/C, N/C, dan Si/C. Namun, untuk material poliimida masih belum bisa dikatakan dapat meningkatkan rasio tersebut atau tidak karena

dari penelitian yang digunakan tidak melampirkan hasil pengujian XPS pada serat karbon tanpa perlakuan. Untuk rasio O/C, N/C, dan Si/C sebelum dan sesudah diberi *sizing treatment* dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Rasio O/C, N/C, dan Si/C dari masing-masing material *sizing*

Mat.	Ref.	O/C		N/C		Si/C	
		SB	SS	SB	SS	SB	SS
PDA	Chen, Cao, dan Feng (2014)	0,153	0,268	0,042	0,095	-	-
	Jiang, dkk (2015)	0,138	0,385	0,031	0,056	-	0,112
SCA	Zheng, dkk (2016)	0,216	0,258 0,265 0,234	0,061	0,019 0,062 0,024	-	0,055 0,049 0,026
	Wen, dkk (2019)	0,218	0,272	0,010	0,063	0,004	0,081
	Yu, dkk (2014)	0,264	0,449	-	-	0,011	0,096
Epoksi	Kafi, dkk (2014)	0,006	0,209	0,016	0,006	0,002	0,001
	Jiang, dkk (2015)	0,138	0,376	0,031	0,021	-	-
Poliuretan	Dilsiz dan Wightman (2000)	0,067	0,271	0,0136	0,031	-	-
	Andideh dan Esfandeh (2017)	0,057	0,277	-	0,068	-	-
Poliimida	Hassan, dkk (2019)	-	0,15	-	-	-	-

4.6.2 Morfologi Serat Karbon dan Komposit

Morfologi serat karbon dengan *sizing treatment* yang didapatkan dari beberapa material *sizing* menunjukkan perbedaan dibandingkan serat karbon tanpa perlakuan. Serat karbon dengan *sizing treatment* dapat menutupi tekstur alur sepanjang serat karbon tanpa perlakuan yang berasal dari prekursor PAN yang digunakan dalam pembuatan serat karbon. Pada material *sizing* PDA, SCA, dan poliuretan dapat meningkatkan kekasaran permukaan dari serat karbon. Pada *sizing treatment* serat karbon dengan epoksi dan poliimida tidak meningkatkan kekasaran permukaan, namun dapat menutupi tekstur alur dari serat karbon tanpa perlakuan sehingga terlihat buram dan kasar. Peningkatan kekasaran pada serat karbon dapat meningkatkan *interlocking* mekanik, karena matriks dapat mengalir di atas serat karbon, mengisi *voids*, kerutan, dan pori-pori pada permukaan serat karbon dan mengikat ke permukaan tersebut (Fraunhofer, 2011).

Untuk pengaruh *sizing treatment* pada serat karbon terhadap morfologi komposit epoksi/serat karbon didapatkan bahwa material *sizing* PDA, SCA, poliuretan, dan epoksi dapat meningkatkan *interface* antara serat karbon dan matriks epoksi. *Interface* dari komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing treatment* terlihat mulus. Selain itu, komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing treatment* juga menunjukkan berkurangnya *gap* pada *interface* dibandingkan dengan serat karbon tanpa perlakuan. Pada komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan terdapat *gap* yang jelas, *pull-out* dan *debonding* antara serat karbon dan matriks epoksi. *Debonding* berasal dari sifat *interface* yang lebih lemah. *Debonding* adalah mekanisme energi disipasi moderat yang menahan kerja fraktur di bagian depan retak dengan mengonsumsi sebagian energi yang diterapkan secara eksternal. Retak baru yang terbentuk pada matriks nantinya akan mendekati sekitar serat dan membelokkan ke sepanjang *interface* yang menyebabkan pecahnya ikatan antara matriks dan serat. Serat-serat *bridging* yang diregangkan membawa langsung energi/beban yang diterapkan secara eksternal, sehingga secara

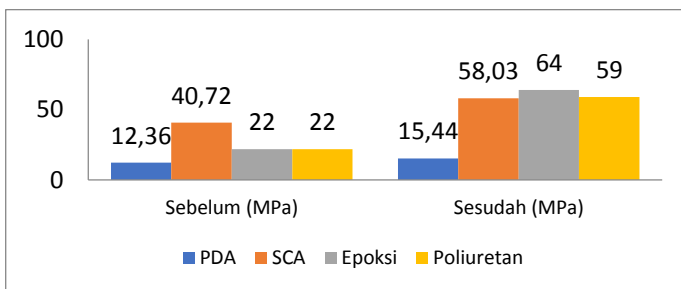
signifikan mengurangi energi yang dipasok pada ujung retak. Energi hilang sebagai gesekan pada *interface* serat/matriks karena mekanisme *sliding*. Energi yang disimpan dalam serat-serat *bridging* akan mencapai tingkat kritis dengan beban lebih lanjut, cukup untuk menyebabkan kegagalan serat. Jika kegagalan serat terjadi sepanjang serat yang terpapar pada sisi retak, serat akan tetap tidak aktif dalam hal kontribusi beban. Jika kegagalan serat terjadi sepanjang *debonded*, serat akan mengalami *pull-out*. Serat tersebut memiliki kontribusi aktif pada komposit karena gaya *shear frictional* selama *sliding* di sepanjang *interface debonded*. Energi yang dikonsumsi sebagai gesekan pada *interface* merupakan kontribusi dari mekanisme *pull-out* terhadap kapasitas disipasi energi komposit (Dassios, 2007).

Hasil patahan serat karbon tanpa perlakuan juga memiliki permukaan yang halus yang mengindikasikan bahwa *interface* antara serat dan matriks yang buruk karena matriks tidak mengikat serat. Pada hasil patahan serat karbon yang diberi *sizing treatment*, didapatkan permukaan serat karbon yang kasar karena matriks epoksi yang masih melekat pada serat karbon yang mengindikasikan bahwa *interface* antara serat dan matriks yang baik karena matriks epoksi dapat mengikat serat karbon.

4.6.3 IFSS (*Interfacial Shear Strength*)

Interface memainkan peran penting dalam transfer stres antara serat dan matriks. Jika ikatan antara serat dan matriks lemah, maka komposit mulai membentuk celah matriks pada tegangan yang relatif rendah. Jika serat terikat kuat ke matriks, retak matriks dapat tertunda dan kegagalan komposit serempak karena patah serat dan retak matriks (Talreja dan Singh, 2012). Dari hasil penelitian terkait *sizing treatment* pada serat karbon terhadap komposit epoksi/serat karbon dengan PDA, SCA, poliuretan, dan epoksi, didapatkan bahwa pemberian *sizing treatment* dapat meningkatkan nilai IFSS dari komposit epoksi/serat karbon. Kenaikan nilai IFSS dengan *sizing treatment* didapatkan karena lapisan *sizing* pada permukaan serat karbon

meningkatkan gaya geser pada *interface*. Pada komposit epoksi/serat karbon tanpa perlakuan, di mana resin epoksi cenderung sepenuhnya terlepas dari serat karbon dan mempertahankan permukaan yang relatif halus, seperti yang dapat dilihat dari hasil morfologi komposit epoksi/serat karbon, yang disebabkan oleh energi ikat yang lemah antara permukaan epoksi dan serat karbon. Namun pada serat karbon dengan *sizing treatment*, retakan merambat melalui *interface* lapisan *sizing* dan epoksi dengan jalur retakan tidak lurus dan serat masih terikat dengan epoksi, yang menunjukkan bahwa *sizing* dapat meningkatkan lapisan *interface* dengan meningkatkan transfer beban antara permukaan epoksi dan serat karbon (Han, dkk, 2018). Kekuatan *interface* menentukan tingkat *debonding* dan panjang serat *pull-out*. Kekuatan *interface* yang lebih rendah memberikan panjang *debond* yang lebih besar dan kemungkinan lebih tinggi untuk kegagalan serat (Dassioss, 2007). Selain itu peningkatan kekasaran permukaan dan kompatibilitas kimia yang lebih baik dengan matriks juga menjadi alasan peningkatan nilai IFSS dari masing-masing material *sizing*, dimana peningkatan kekasaran dapat memberikan lebih banyak titik kontak antara serat dan matriks dan material *sizing* yang sesuai dengan matriksnya dapat meningkatkan *wettability* serat oleh matriks. Pada Gambar 4.15 dan Tabel 4.15 menunjukkan nilai IFSS dari masing-masing referensi dan material *sizing*.



Gambar 4.15 Grafik nilai IFSS dari masing-masing material *sizing*

Tabel 4.15 Nilai IFSS dari masing-masing material *sizing*

Referensi	Material <i>Sizing</i>	Sebelum (MPa)	Sesudah (MPa)	Kenaikan (%)
Han, dkk (2018)	<i>Polydopamine</i>	12,36	15,44	25
	<i>Silane</i>			
Yu, dkk (2014)	<i>Coupling Agent (GPS- SCA)</i>	83,8 ± 11,1	96,0 ± 17,8	14,5
	<i>MS-SCA</i>	58,15	72,09	24
Zheng, dkk (2016)	<i>APS-SCA</i>	58,15	76,99	32
	<i>GPS-SCA</i>	58,15	79,09	36
	<i>Silane</i>			
Wen, dkk (2019)	<i>Coupling Agent (APS- SCA)</i>	40,72	58,03	42,5
Zhang (2015)	Epoksi	34,2	87,9	157
Gnadinger, Middendorf, dan Fox (2016)	Epoksi	23 dan 22	62 dan 64	169 dan 191
	Poliuretan	23 dan 22	59 dan 59	156 dan 168
Dilsiz dan Whitman (2000)	Poliuretan	28,0 ± 6	13,5 ± 2	-

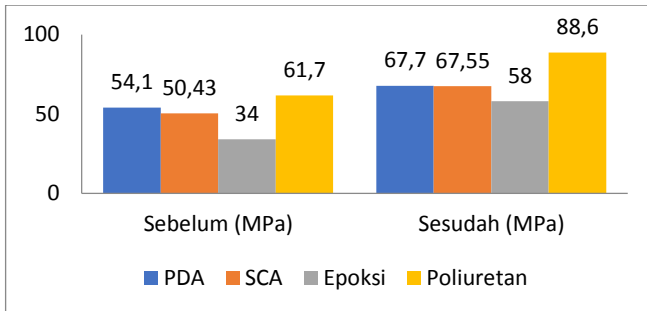
4.6.4 ILSS (*Interlaminar Shear Strength*)

Meningkatkan kekuatan interlaminar dapat mencegah kerusakan delaminasi pada komposit. Delaminasi adalah mode kegagalan interlaminar yang merupakan awal dari kegagalan utama. Delaminasi terjadi antara dua lapisan dengan orientasi yang berbeda dalam laminasi karena tekanan interlaminar tinggi yang bekerja pada *interface* antara lapisan atas dan bawah (Domadon dan Almeida, 2014). Nilai ILSS dari masing-masing serat karbon dengan *sizing* mengalami kenaikan dibandingkan serat karbon tanpa perlakuan. Peningkatan ini membuktikan ikatan *interface* antara matriks dan serat yang lebih baik dibandingkan tanpa *sizing*, dimana transfer tegangan menjadi

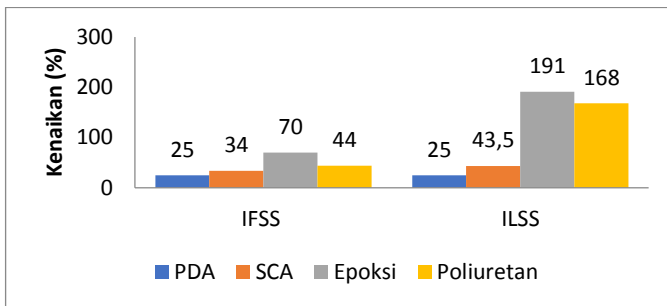
lebih efisien (Han, dkk, 2018; Chen, Cao, dan Feng, 2014). Peningkatan ini juga dikarenakan serat karbon sesuai dengan perannya yaitu sebagai penguat. Kegagalan interlaminar biasanya karena matriks yang sifatnya lebih lemah mengatur kekuatan struktural komposit (Talreja dan Singh, 2012). Meningkatnya kandungan gugus fungsional yang mengandung oksigen dapat meningkatkan aktivitas kimia antara serat karbon dan resin epoksi, yang juga menghasilkan peningkatan adhesi serat karbon dan epoksi dan akhirnya dapat meningkatkan sifat mekanik dari komposit (Wen, dkk, 2019). Difusi dan *interlocking* mekanik dari resin epoksi dan material *sizing* pada permukaan serat karbon juga dapat meningkatkan nilai ILSS (Hassan, dkk, 2019). Kenaikan nilai ILSS dari masing-masing material *sizing* dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan Tabel 4.16. Presentase kenaikan nilai IFSS dan ILSS dari masing-masing jenis material *sizing* ditunjukkan pada Gambar 4.17.

Tabel 4.16 Nilai ILSS serat karbon dengan *sizing*

<i>Sizing</i>	Referensi	ILSS (MPa)		Kenaikan (%)
		Sebelum	Sesudah	
PDA	Han, dkk (2019)	54,1	67,7	25
SCA	Wen, dkk (2019)	50,43	67,55	34
Epoksi	Kafi, dkk (2014)	34 ± 4,4	58 ± 2,5	70
	Ma, dkk (2016)	-	67,67	-
Poliuretan	Andideh dan Esfandeh (2017)	61,7 ± 1,3	88,6 ± 3,9	44
Poliimida	-	-	-	-



Gambar 4.16 Grafik nilai ILSS dari masing-masing material *sizing*



Gambar 4.17 Grafik presentase kenaikan nilai IFSS dan ILSS dari masing-masing material *sizing*

4.6.5 Aplikasi pada Komposit

Sensitivitas sifat komposit terhadap adhesi serat-matriks akan diatur oleh bagaimana matriks dan serat dihubungkan dan bagaimana beban yang diterapkan ditransfer dan didistribusikan dalam komposit. Dalam kasus tegangan longitudinal, matriks dan serat dihubungkan melalui *interface* matriks-serat secara paralel dan sebagian besar beban yang diterapkan ditanggung oleh serat. Oleh karena itu, sejauh menyangkut mekanisme distribusi beban, adhesi serat-matriks tidak memainkan peran dominan dalam perilaku longitudinal *tensile*. Namun, perubahan dalam mode kegagalan yang dihasilkan dari perubahan adhesi serat-matriks

mungkin memiliki efek pada kekuatan tarik longitudinal. Di sisi lain, dalam kasus tegangan transversal, matriks dan serat dihubungkan melalui *interface* matriks-serat secara seri dan ketiga komponen, yaitu serat, matriks, dan *interface/interphase* membawa beban yang sama. Dalam kasus seperti itu, adhesi serat-matriks diharapkan memiliki efek dominan pada sifat komposit.

Kekuatan tarik dapat meningkat dengan meningkatnya kekuatan IFSS hanya selama kegagalan terutama pada *interface*. Dalam situasi seperti itu, zona kegagalan yaitu serat-matriks *splitting*. Namun, jika kekuatan *interface* terlalu lemah, komposit gagal sebelum waktunya karena pelemahan kumulatif material. Ketika kekuatan ikatan *interface* berlebihan, mode kegagalan berubah menjadi seperti material getas. Dengan demikian, kekuatan ikatan serat-matriks yang berlebihan dapat memiliki efek yang merugikan pada kekuatan tarik komposit. Selain kekuatan tarik, kekuatan flexural juga mengalami peningkatan ketika *interface* antara serat dan matriks menjadi lebih baik. Peningkatan ini terlihat pada kekakuan dan kekuatan flexural ketika IFSS meningkat dari tingkat sedang ke tingkat tertinggi. Peningkatan kekakuan ini disebabkan oleh adanya interface modulus tinggi dan bahwa kekuatan dikaitkan dengan kemampuan *interface* yang kuat untuk menekan kegagalan interlaminar (Drzal dan Madhukar, 1993).

Pada aplikasi otomotif dan *blade* turbin angin dengan nilai ILSS masing-masing 52 dan 47 MPa dengan perbedaan metode manufaktur komposit. Penggunaan *sizing* dengan epoksi dapat memenuhi nilai ILSS tersebut yaitu dengan nilai 58 MPa. Untuk *sizing* poliuretan didapatkan nilai sebesar ILSS 88,6 MPa. Untuk *sizing* SCA didapatkan nilai ILSS sebesar 67,55 MPa. Untuk *sizing* PDA didapatkan nilai ILSS sebesar 67,7 MPa. Dari keempat material tersebut, masing-masing material tersebut dapat diaplikasikan pada aplikasi otomotif dan *blade* turbin angin karena nilai ILSS yang didapatkan melebihi standar dari nilai ILSS yang dibutuhkan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari pembahasan jurnal terkait pengaruh beberapa material *sizing* pada serat karbon adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh jenis material *sizing treatment* pada serat karbon terhadap morfologi serat karbon yaitu
 - a. *Polydopamine* meningkatkan kekasaran pada serat karbon dan melapisi tekstur alur yang terdapat pada permukaan serat karbon.
 - b. *Silane coupling agent* meningkatkan kekasaran pada serat karbon dan melapisi tekstur alur yang terdapat pada permukaan serat karbon.
 - c. Epoksi melapisi tekstur alur yang terdapat pada permukaan serat karbon.
 - d. Poliuretan meningkatkan kekasaran pada serat karbon dan melapisi tekstur alur yang terdapat pada permukaan serat karbon.
 - e. Poliimida melapisi tekstur alur yang terdapat pada permukaan serat karbon.
2. Pengaruh jenis material *sizing treatment* pada serat karbon terhadap morfologi dan sifat mekanik komposit epoksi/serat karbon yaitu
 - a. *Polydopamine* mengurangi *gap* antara serat karbon dan matriks epoksi, patahan serat karbon masih berikatan dengan matriks epoksi. Nilai IFSS dan ILSS meningkat sebesar 25%.
 - b. *Silane coupling agent* mengurangi *gap* antara serat karbon dan matriks epoksi, patahan serat karbon masih berikatan dengan matriks epoksi. Nilai IFSS meningkat sebesar 14,5-42,5% dan ILSS meningkat sebesar 34%.
 - c. Epoksi mengurangi *gap* antara serat karbon dan matriks epoksi, patahan serat karbon masih melekat dengan

- matriks epoksi. Nilai IFSS meningkat sebesar 157-191% dan ILSS meningkat sebesar 70%.
- d. Poliuretan mengurangi *gap* antara serat karbon dan matriks epoksi, patahan serat karbon masih berikatan dengan matriks epoksi. Nilai IFSS meningkat sebesar 156-168% dan ILSS meningkat sebesar 44%.
 - e. Belum ada publikasi terkait pengaruh *sizing* poliimida pada serat karbon terhadap komposit epoksi/serat karbon
3. Jenis material *sizing treatment* yang paling efektif untuk komposit epoksi/serat karbon adalah epoksi, dengan meningkatkan nilai IFSS sebesar 157-191% dan nilai ILSS sebesar 70%.

5.2 Saran

Adapun saran dari dan bagi penulisan tinjauan ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian lebih lanjut terkait pengaruh metode preparasi dari *sizing* PDA terhadap sifat mekanik komposit epoksi/serat karbon
2. Melakukan penelitian lebih lanjut terkait pengaruh *sizing* poliimida terhadap morfologi dan sifat mekanik komposit epoksi/serat karbon
3. Melakukan penelitian lebih lanjut terkait pengaruh imidisasi kimia dan termal dari *sizing* poliimida terhadap morfologi dan sifat mekanik komposit epoksi/serat karbon

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurohman, K., T. Satrio, N. L. Muzayadah, dan Teten. 2018. "A Comparison Process Between Hand Lay-Up, Vacuum Infusion, and Vacuum Bagging Method Toward E-glass EW 185/Lycal Composites". **Journal of Physics**, 1130, 1-10.
- Adrian, POP. P, dan BEJINARU MIHOC Gheorghe. 2010. "Manufacturing Process and Applications of Composite Materials". **Fascicle of Management and Technological Engineering**, IX, 3.1-3.6.
- Andideh, Mohammad dan Masoud Esfandeh. 2017. "Effect of surface modification of electrochemically oxidized carbon fibers by grafting hydroxyl and amine functionalized hyperbranched polyurethanes on interlaminar shear strength of epoxy composites". **Carbon**. 1-46.
- Askeland, D.R., 1989. **The Science and Engineering of Materials, 2d ed.** Boston. PWS. Kent p.591
- Burchell, Timothy D. 1999. **Carbon Materials for Advanced Technologies**. Netherlands: Elsevier Science Ltd.
- Callister, W. D. 2007. **Materials Science and Engineering**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, F. C. 2010. **Structural Composite Materials**. ASM International.
- Chawla, Krishan K. 2012. **Composite Materials Science and Engineering**. Birmingham: Springer Science+Business Media New York.
- Chen, Susheng, Yewen Cao, dan Jiachun Feng. 2014. "Polydopamine As an Efficient and Robust Platform to Functionalize Carbon Fiber for High-Performance Polymer Composites". **Applied Material Interfaces**. 6. 349-356.
- Chung, Deborah D. L. 1994. **Carbon Fiber Composite**. Oxford: Butterworth-Heinemann.

-
- Dilsiz, Nursel dan J.P. Wightman. 2000. "Effect of acid–base properties of unsized and sized carbon fibers on fiber/epoxy matrix adhesion". **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 164. 325-336.
- Drzal, L.T., dan M. Madhukar. 1993. "Fiber-matrix adhesion and its relationship to composite mechanical property". **Journal of Material Science**. 28. 569-610
- Fernandez, B., A. Arbelaiz, A. Valea, F. Mujika, dan I. Mondragon. 2004. "A Comparative Study on the Influence of Epoxy Sizings on the Mechanical Performance of Woven Carbon Fiber-Epoxy Composites". **Polymer Composite**. 25. 319-330.
- Fitzer, E. 1990. "Carbon Fibres and Composites". **Carbon Fiber Filaments and Composites**, 169-219.
- Fraunhofer, J. Anthony von. 2012. "Adhesion and Cohesion". **International Journal of Dentistry**. 2012. 1-8.
- Freile-Palegrin, Y., & Madera-Santana, T.J. 2017. "Characterization Techniques for Algae-Based Materials". **Algae Based Polymers, Blends, and Composites**. 649-670.
- Geier, Norbert, J. Paulo Davim, dan Tibor Szalay. 2019. "Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review". **Composites Part A**. 125. 1-15.
- Gnadinger, Florian, Peter Maddendorf, dan Bronwyn Fox. 2016. "Interfacial shear strength studies of experimental carbon fibres, novel thermosetting polyurethane and epoxy matrices and bespoke sizing agents". **Composites Science and Technology**. 133. 104-110.
- Han, Wei, Hong-Ping Zhang, Javad Tavakoli, Jonathan Campbell, dan Youhong Tang. 2018. "Polydopamine as sizing on carbon fiber surfaces for enhancement of epoxy laminated composites". **Composites: Part A**. 1-24.
- Hassan, Elwathig A.M, Dengteng Gea, Shu Zhua, Lili Yanga, Jianfeng Zhoua, dan Muhuo Yua. 2019. "Enhancing
-

- CF/PEEK composites by CF decoration with polyimide and loosely-packed CNT arrays”. **Composites Part A**. 127. 1-7.
- He, Shuqing, Shouchun Zhang, Chunxiang Lu, Gangping Wu, Yu Yang, Feng An, Jinhai Guo, dan Hai Li. 2011. “Polyimide nano-coating on carbon fibers by electrophoretic depositio”. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 381. 118-122.
- Ho, Chia-Che dan Shinn-Jyh Ding. 2014. ”Structure, Properties and Applications of Mussel-Inspired Polydopamine”. **Journal of Biomedical Nanotechnology**. 10. 3063-3084.
- Inkson, B. J. 2016. **Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods**. Elsevier Ltd.
- Jamir, M. R. M., Majid M. S. A., dan Khasri A. 2018. "Natural Lightweight Hybrid Composites for Aircraft Structural Applications". **Sustainable Composites for Aerospace Applications**. 155-170.
- Jang, J., & Yang, H. 2000. "Effect of Surface Treatment on the Performance Improvement of Carbon Fiber / Polybenzoxazine Composites". **Journal of Materials Science**, 35, 2297– 2303.
- Jiang, S., Li, Q., Zhao, Y., Wang, J., & Kang, M. 2015. "Effect of Surface Silanization of Carbon Fiber on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Polyurethane Composites". **Composites Science and Technology**. 1-21.
- Kafi, Abdullah, Mickey Huson, Claudia Creighton, Jiyi Khoo, Luca Mazzola, Thomas Gengenbach, Frank Jones, dan Bronwyn Fox. 2014. “Effect of surface functionality of PAN-based carbon fibres on the mechanical performances of carbon/epoxy composites”. **Composite Science and Technology**. 94. 89-95.
- Karger-Kocsis, József , Haroon Mahmood, dan Alessandro Pegoretti. 2019. “All-carbon multi-scale and hierarchical fibers and related structural composites: A review”. **Composites Science and Technology**. 1-47.

-
- Kim, Han Joo dan Jun Hee Song. 2018. "Improvement in the mechanical properties of carbon and aramid composites by fiber surface modification using polydopamine". **Composites Part B**. 1-15.
- Kim, Jang-Kyo, Yiu-Wing Mai, dan Yiu-Wing Mai. 1998. **Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites**. Elsevier, Ltd.
- Konno, Hidetaka. 2016. **Materials Science and Engineering of Carbon: Characterization**. Elsevier Inc.
- Kumari, Anila, Jasmeet Kaur, dan Shalmoli Bhattacharya. 2018. "Application of Fourier Transform-Infrared Spectroscopy as a Tool for Early Cancer Detection". **American Journal of Medical Science**. 10(3). 139-148.
- Kumudinie, C. 2001. "Polymer–Ceramic Nanocomposites: Interfacial Bonding Agents". **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. 7574-7577.
- KV, Kundan, Prajakta Katti, S. Kumar, dan Suryasarathi Bose. 2017. "Assessing the interfacial properties in carbon fiber / epoxy nano composites: From 'interlayers' to 'inter connects'". **Nano-structures & Nano-objects**. 12. 194-209.
- Liaw, Der-Jang, Kung-Li Wang, Ying-Chi Huang, Kueir-Rarn Lee, Juin-Yih Lai, dan Chang-Sik Ha. 2012. "Advanced polyimide materials: Syntheses, physical properties, and applications". **Progress in Polymer Science**. 37. 907-974.
- Licari, James J dan Dale W Swanson. 2011. **Adhesives Technology for Electronic Applications**. Elsevier Inc.
- Liebscher, Jurgen. 2019. "Chemistry of Polydopamine – Scope, Variation, and Limitation". **Organic Chemical**. 1-20.
- Li, Song, Xiao Lia, Mingchao Shaoa, Jingjing Yanga, Qihua Wanga, Tingmei Wanga, dan Xinrui Zhang. 2019. "Regulating interfacial compatibility with amino silane and bio-inspired polydopamine for high-performance epoxy composites". **Tribology International**. 140. 1-9.
-

-
- Liu, Yuan, Yichao Fang, Jianhua Qian, Zuozhen Liu, Bin Yang, dan Xinling Wang. 2015. "Bio-inspired polydopamine functionalization of carbon fiber for improving the interfacial adhesion of polypropylene composites". **RSC Advances**. 5. 107652–107661.
- Mallick, P. K. 2012. **Advanced Materials in Automotive Engineering**. Dearborn: Woodhead Publishing Limited.
- Marieta, C., E. Schulz, dan I. Mondragon. 2002. "Characterization of interfacial behaviour in carbon-fibre/cyanate composites". **Composites Science and Technology**. 62. 299-309.
- Ma, Quansheng, Yizhuo Gu, Min Li, Shaokai Wang, dan Zuoguang Zhang. 2016. "Effects of Surface Treating Methods of High-Strength Carbon Fibers on Interfacial Properties of Epoxy Resin Matrix Composite". **Applied Surface Science**. 379. 199-205.
- Moosburger-Will, Judith, Matthias Bauer, Eva Laukmanis, Robert Horny, Denise Wetjen, Tamara Manske, Felix Schmidt-Stein, Jochen Topker, dan Siegfried Horn. 2018. "Interaction between carbon fibers and polymer sizing: Influence of fiber surface chemistry and sizing reactivity". **Applied Surface Science**. 439. 305-312.
- Paluvai, Nagarjuna Reddy, Smita Mohanty, dan S. K. Nayak. 2014. "Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review". **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, 53, 1723–1758
- Pape, Peter G. 2011. **Applied Plastic Engineering Handbook**. Elsevier Inc.
- Petrie, Edward M. 2006. **Epoxy Adhesive Formulations**. United States of America: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Ratna, Debdatta. 2009. **Handbook of Thermoset Resin**. Shropshire: Lightning Source Inc.
- Reghunadhan, Arunima dan Sabu Thomas. 2017. "Polyurethanes: Structure, Properties, Synthesis, Characterization, and
-

- Applications". **Polyurethane Polymers: Blends and Interpenetrating Polymer Networks**. 1-16.
- Ren, Yuanqiang, Lei Qiu, Shenfeng Yuan, dan Fang fang. 2020. "Gaussian Mixture Model and Delay-and-Sum based 4D imaging of Damage in Aircraft Composites Structure under Time-varying Condition". **Mechanical System and Signal Processing**, 135, 1-16.
- Renliang Ma, Weiwei Li, Momo Huang, Xiaojing Liu, dan Ming Feng. 2018. "Enhancing strength and toughness of carbon fibers reinforced rigid polyurethane composites with low fiber content". **Polymer Testing**. 1-20.
- Sanaeepur, Hamidreze, Abtin Ebadi Amooghin, Samaneh Bandehali, Abdolreza Moghadassi, Takeshi Matsuura, dan Bart Van der Bruggen. 2019. "Polyimides in membrane gas separation: Monomer's molecular design and structural engineering". **Progress in Polymer Science**. 91. 80-125.
- Sharma, Mohit, Shanglin Gao, Edith Mader, Himani Sharma, Leong Yew Wei, dan Jayashree Bijwe. "Carbon fiber surfaces and composite interphases". **Composite Science and Technology**. 102. 35-50.
- Somarathna, H.M.C.C., S.N. Raman, D. Mohotti, A.A. Mutalib, dan K.H. Badri. 2018. "The use of polyurethan for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review". **Construction and Building Materials**. 190. 995-1014.
- Sulistijono. 2012. **Mekanika Material Komposit**. Surabaya: ITS Press.
- Tiwari, S., & Bijwe, J. 2014. "Surface Treatment of Carbon Fibers - A Review". **Procedia Technology**, 14, 505-512.
- Verdtnam, Ajitanshu dan Sahendra P. Sharma. 2019. "Study on the performance of different nano-species used for surface modification of carbon fiber for interface strengthening". **Composites Part A**. 125. 1-18.
- Wang, Zhenxing, Hao-Cheng Yang, Fang He, Shaoqin Peng, Yuexiang Li, Lu Shao, dan Seth B. Darling. "Mussel-

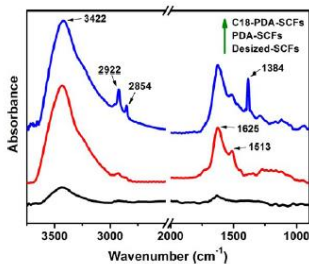
- inspired surface engineering for water-remediation materials”. **Matter**. 1. 115-155.
- Wen, Zhangping, Cheng Xu, Xin Qian, Yonggang Zhang, Xuefei Wang, Shulin Song, Mingzhi Dai, dan Cheng Zhang. 2019. “A two-step carbon fiber surface treatment and its effect on the interfacial properties of CF/EP composites: The electrochemical oxidation followed by grafting of silane coupling agent”. **Applied Surface Science**. 486. 546-554.
- Wu, Zhanjun, Qin Zhuo, Tao Sun, dan Zhi Wang. 2014. “Mechanical Properties of Epoxy Resins Reinforced with Synthetic Boehmite (AlOOH) Nanosheets”. **Journal of Applied Science**. 1-6.
- Yuan, Hao-jie, Chun-xiang Lu, Shou-chun Zhang, dan Gang-ping Wu. 2015. “Preparation and characterization of a polyimide coating on the surface of carbon fibers”. **New Carbon Materials**. 30(2). 115-121.
- Yu, Bin, Zhenyu Jiang, Xiu-Zhi Tang, Chee Yoon Yue, dan Jinglei Yang. 2014. “Enhanced interphase between epoxy matrix and carbon fiber with carbon nanotube-modified silane coating”. **Composites Science and Technology**. 99. 131-140.
- Zhang, Jing. 2015. “Different surface treatments of carbon fibers and their influence on the interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites”. **Materials**. Ecole Centrale Paris.
- Zhang, Tao, Yueqing Zhao, Hongfu Li, dan Boming Zhang. 2018. “Effect of polyurethane sizing on carbon fibers surface and interfacial adhesion of fiber/polyamide 6 composites”. **Journal of Applied Polymer Science**. 1-10.
- Zheng, Nan, Jinmei He, Dan Zhao, Yudong Huang, Jiefeng Gao, dan Yiu-Wing Mai. 2016. “Improvement of atomic oxygen erosion resistance of carbon fiber and carbon fiber/epoxy composite interface with a silane coupling agent”. **Materials & Design**. 1-18.
- Zhou, Jing, Yingguang Li, Nanya Li, Xiaozhong Hao, dan Changqing Liu. 2016. “Interfacial shear strength of

microwave processed carbon fiber/epoxy composites characterized by an improved fiber-bundle pull-out test". **Composite Science and Technology**. 133. 173-183.

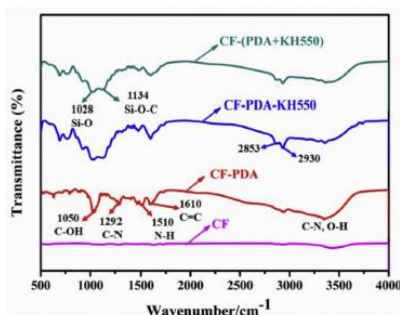
LAMPIRAN

A Polydopamine

Hasil Pengujian Karakteristik Kimia



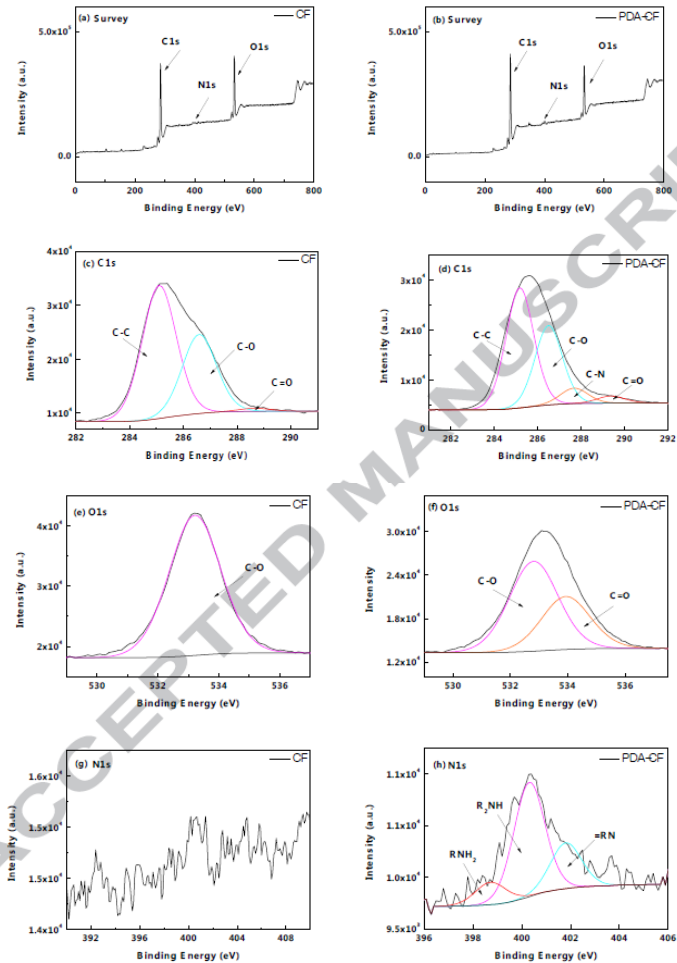
Gambar A.1 Spektra FTIR *Desized*-SCFs, PDA-SCFs, dan C18-PDA-SCFs (Chen, Cao, dan Feng, 2014)



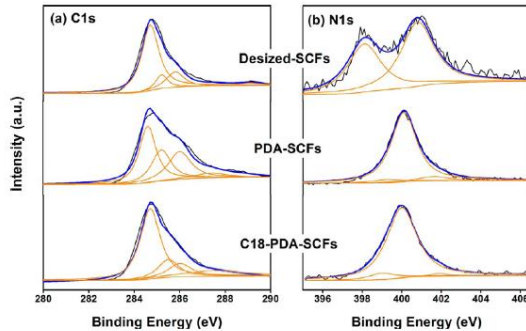
Gambar A.2 Spektra FTIR (Li, dkk, 2019)

Tabel A.1 Komposisi atom (Chen, Cao, dan Feng, 2014)

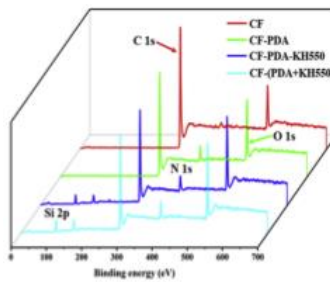
Sample	Komposisi atom			-N= (%)	-NH- (%)	N ⁺ (%)	N/C rasio atom
	Karbon	Oksigen	Nitrogen				
<i>Desized</i> -CF	70,32	10,79	2,95	43,0	-	57,0	0,042
PDA-CF	71,25	19,12	6,72	4,3	89,7	6,0	0,095



Gambar A.3 Spektra XPS serat karbon sebelum dan sesudah *sizing treatment* dengan PDA (Han, dkk, 2018).

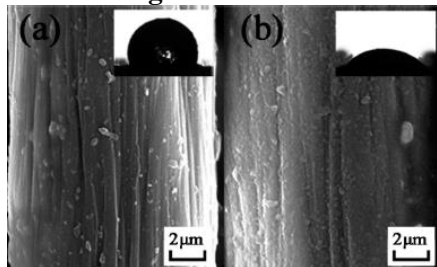


Gambar A.4 Hasil pengujian XPS a) spektra C1s b) spektra N1s (Chen, Cao, dan Feng, 2014)

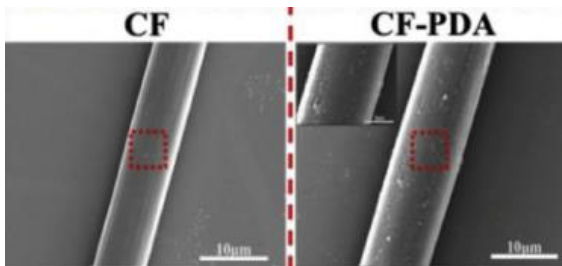


Gambar A.5 Spektra XPS (Li, dkk, 2019)

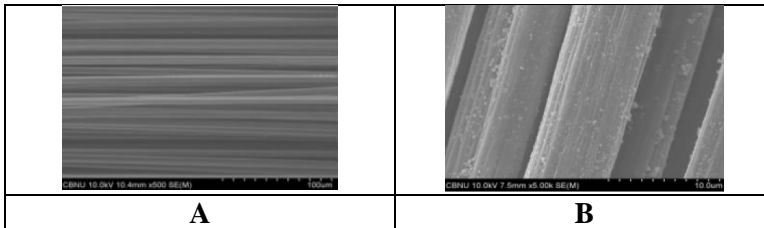
Hasil Pengujian Morfologi Serat Karbon dan Komposit



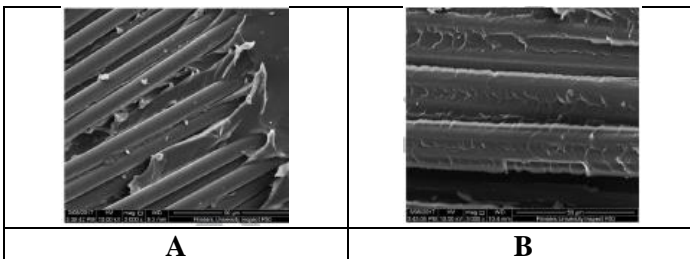
Gambar A.6 Hasil pengujian SEM dan WCA a) *Desized*-SCFs b) PDA-SCFs (Chen, Cao, dan Feng, 2014)



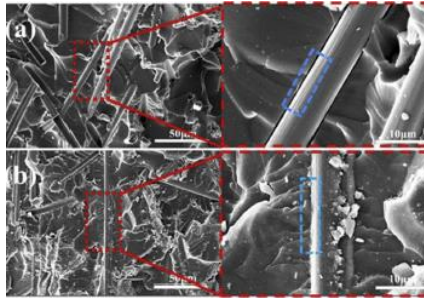
Gambar A.7 Serat karbon sebelum dan sesudah diberi *sizing treatment* dengan PDA (Li, dkk, 2019)



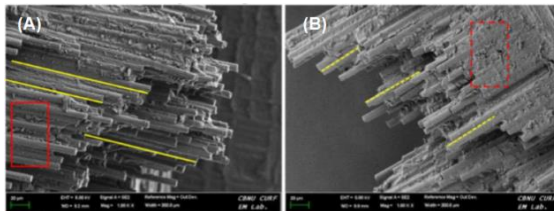
Gambar A.8 Hasil pengujian SEM serat karbon A) tanpa perlakuan B) *sizing treatment* dengan PDA (Kim dan Song, 2018)



Gambar A.9 Kegagalan *interface* pada komposit A) Serat karbon tanpa perlakuan B) serat karbon *sizing treatment* dengan PDA (Han, dkk, 2018)

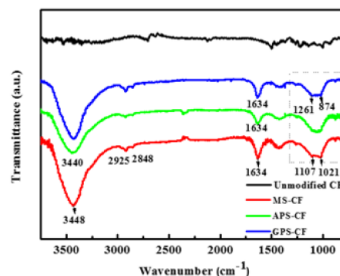


Gambar A.10 Morfologi komposit epoksi/serat karbon a) tanpa perlakuan b) dengan *sizing* PDA (Li, dkk, 2019)

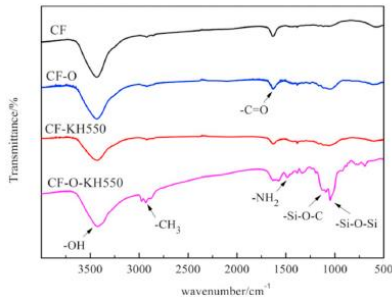


Gambar A.11 Morfologi komposit epoksi/serat karbon dengan *sizing* PDA A) TRIS 10mM PDA 1,5g/L B) TRIS 40mM PDA 1,5g/L (Kim dan Song, 2019)

B. Silane Coupling Agent Hasil Pengujian Karakteristik Kimia



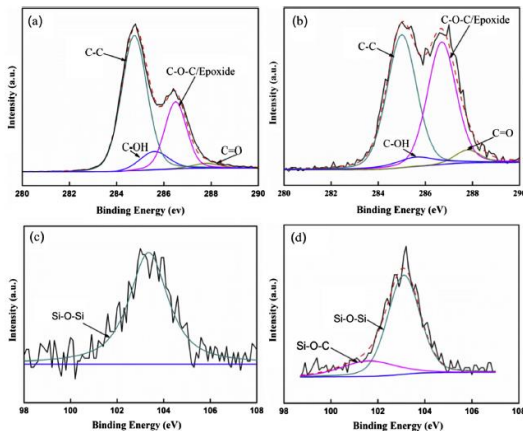
Gambar B.1 Spektra FTIR serat karbon-SCA (Zheng, dkk, 2016)



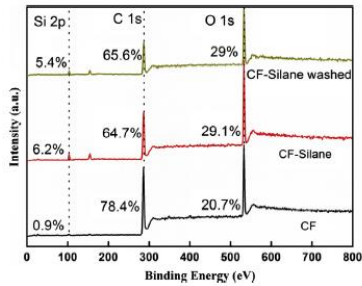
Gambar B.2 Spektra FTIR dari beberapa *treatment* (Wen, dkk, 2019).

Tabel B.1 Peak C1s (Yu, dkk, 2014)

Serat karbon	C-C (%)	C-OH (%)	C-O-C/Epoxide (%)	C=O (%)
Tanpa perlakuan	61,99	9,61	26,15	2,25
SCA	47,65	6,01	42,24	4,00
	284,9 Ev	285,6 Ev	286,6 eV	287,8 eV



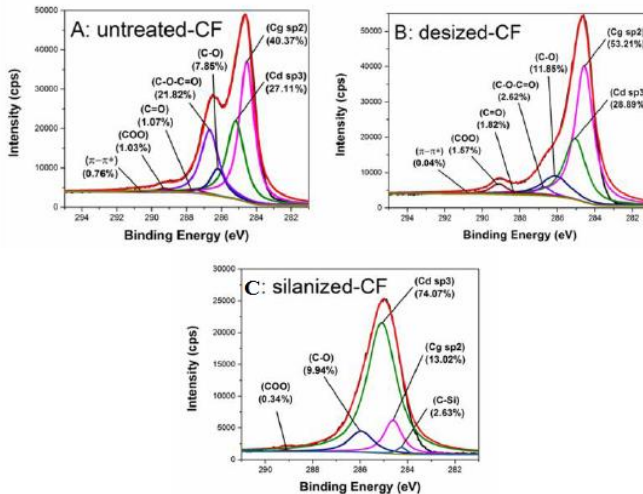
Gambar B.3 Spektra C1s a) tanpa perlakuan b) *sizing* SCA dan spektra Si2p c) tanpa perlakuan d) *sizing* SCA (Yu, dkk, 2014)



Gambar B.4 Wide scan spektra XPS (Yu, dkk, 2014)

Tabel B.2 Hasil XPS serat karbon (Jiang, dkk, 2015)

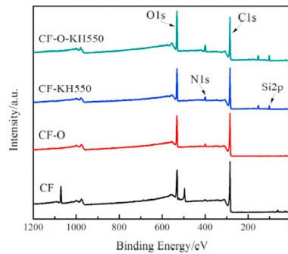
Sampel	C (%)	O (%)	N (%)	Si (%)	O/C
<i>Sizing</i> Epoksi	71,6	26,9	1,5	-	0,3757
<i>Desized</i>	85,5	11,8	2,7	-	0,1380
SCA	64,4	24,8	3,6	7,2	0,3851



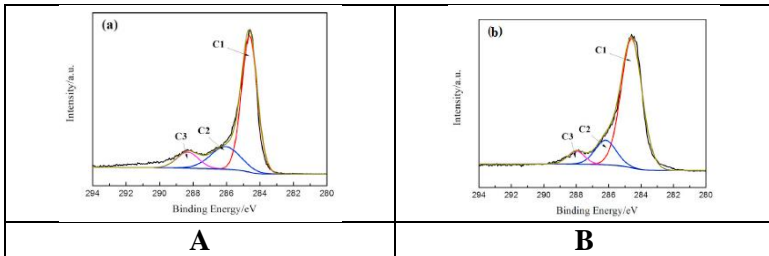
Gambar B.5 Spektra XPS serat karbon a) epoksi *sizing* b) *desized* c) *sizing* SCA (Jiang, dkk, 2015).

Tabel B.3 Hasil Pengujian XPS (Zheng, dkk, 2016)

Sampel	Komposisi dan konten elemen (%)			
	C	O	N	Si
<i>Untreated CF</i>	78,28	16,97	4,75	-
<i>Methyltrimethoxysilane</i>	75,01	19,37	1,48	4,14
<i>γ-aminopropyltriethoxysilane</i>	72,65	19,26	4,51	3,58
<i>γ-glycidoxypropyltrimethoxysilane</i>	77,89	18,27	1,84	2,00

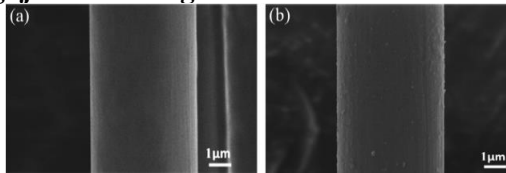
**Gambar B.6** Spektra XPS (Wen, dkk, 2019)**Tabel B.4** Hasil XPS (Wen, dkk, 2019)

	Sampel	CF	CF-KH550
<i>Surface Elements (%)</i>	C1s	81,12	70,60
	N1s	0,87	4,46
	O1s	17,69	19,25
	Si2p	0,32	5,69
Rasio	N/C	0,010	0,063
	O/C	0,218	0,272
	Si/C	0,004	0,081
<i>Functional Group (%)</i>	-C-C	67,94	78,62
	-C-OH	21,25	14,95
	-COOH	10,81	6,43

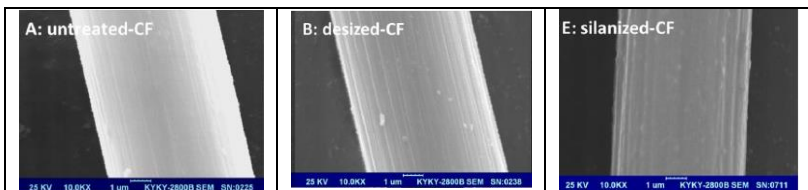


Gambar B.7 Spektra XPS a) serat karbon tanpa perlakuan b) serat karbon dengan SCA (Wen, dkk, 2019).

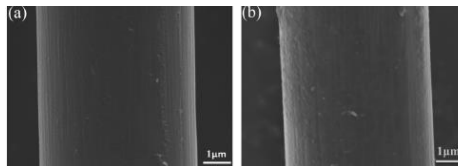
Hasil Pengujian Morfologi Serat Karbon dan Komposit



Gambar B.8 Permukaan serat karbon a) tanpa perlakuan b) dengan *sizing treatment* SCA (Yu, dkk, 2014).



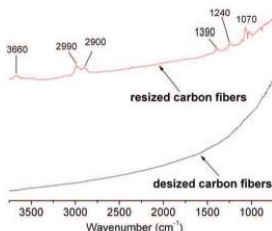
Gambar B.9 Serat karbon a) *sizing* epoksi b) *desizing* c) *sizing* SCA (Jiang, dkk, 2015)



Gambar B.10 Komposit epoksi/serat karbon a) tanpa perlakuan b) dengan *sizing* SCA (Yu, dkk, 2014)

C. Epoksi

Hasil pengujian Karakteristik Kimia



Gambar C.1 Spektra FTIR *resized* dan *desized* dari serat karbon (Zhang, 2015).

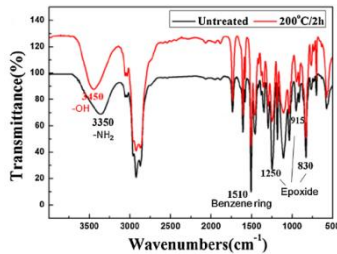
Tabel C.1 Karakteristik *peak* (Zhang, 2015)

	<i>Peak</i> (cm ⁻¹)	<i>Assignment</i>
DGEBA	2970-2870	C-H <i>stretching</i>
	1610	C=C <i>stretching</i> of aromatic rings
	1510	C-C <i>stretching</i> of aromatic rings
	1240, 1035	Ar-O-C <i>stretching</i> of ethers
	915, 831	Cincin Epoksi
EC310	3330	NH ₂ <i>stretching</i>
	2970, 2870	C-H <i>stretching</i>
	1590	N-H <i>deformation</i> vibration
	1450	CH ₂ <i>deformation</i> vibration of -OCH ₂ -
	1370	C-H <i>deformation</i> vibration of R-CH ₃
Serat Karbon Resized	1110	C-N <i>stretching</i>
	3660	O-H <i>stretching</i>
	2990, 2900	C-H <i>stretching</i>
	1390	C-H <i>deformation</i> vibration of R-CH ₃
	1240	Ar-O-C <i>stretching</i> of ethers
	1070	C-N <i>stretching</i>

Tabel C.2 Hasil pengujian XPS serat karbon *sizing* epoksi (Ma, dkk, 2016)

<i>Peak</i> (eV)	<i>Rasio</i> (%)	<i>Functional Group</i>
284,8	66,02	C-C, C-H
286,1	9,86	C-OH, C-O-C, C-NH ₂
286,6	24,10	C-O-C=C, epoksida

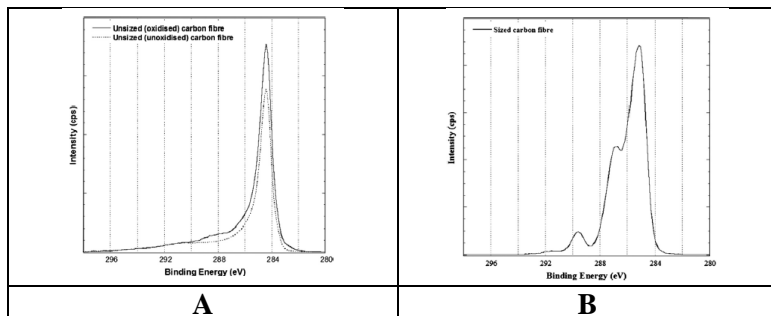
287,7	0	C=O, C=N
289,4	0,02	O-C=O, HO-C=O
Activated Carbon	33,98	



Gambar C.2 Spektra FTIR *sizing* epoksi tanpa perlakuan dan dengan *heat treatment* (Ma, dkk, 2016).

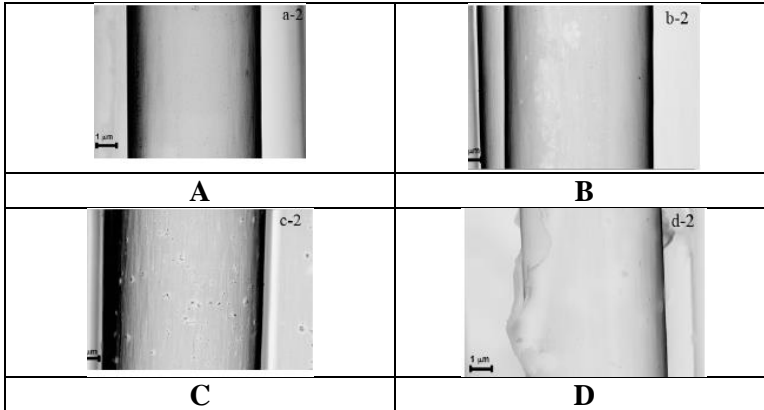
Tabel C.3 Komposisi elemen permukaan (Kafi, dkk, 2014)

Rasio Atom	Unoxidized	Oxidized	Sized
O/C	0,006 ± 0,000	0,067 ± 0,000	0,209 ± 0,002
N/C	0,016 ± 0,000	0,046 ± 0,001	0,006 ± 0,001
Si/C	0,002 ± 0,000	0,001 ± 0,000	0,001 ± 0,000

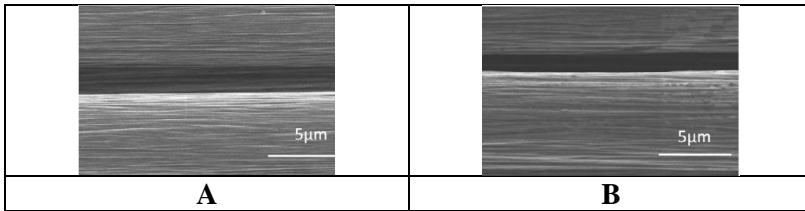


Gambar C.3 Hasil pengujian XPS A) serat karbon *oxidized*, *unoxidized* B) serat karbon *sized* (Kafi, dkk, 2014)

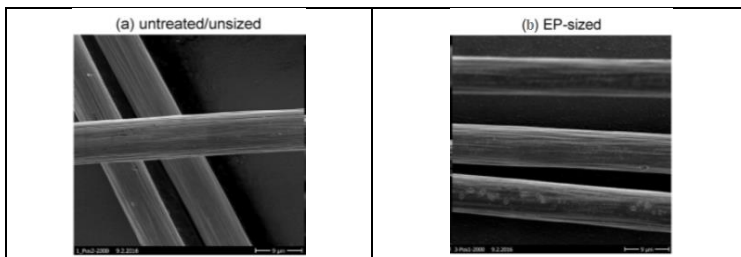
Hasil Pengujian Morfologi Serat Karbon dan Komposit



Gambar C.4 Serat karbon dengan konsentrasi *sizing* A) 0,5% B) 1% C) 2% D) 4% (Zhang, 2015).



Gambar C.5 Serat karbon A) tanpa perlakuan B) dengan *sizing* epoksi (Kafi, dkk, 2014).



Gambar C.6 Serat karbon a) tanpa perlakuan b) epoksi *sizing* (Gnadinger, Middendorf, dan Fox, 2016).

Hasil Pengujian IFSS

Tabel C.4 Pengaruh komposisi *sizing* pada IFSS (Zhang, 2015)

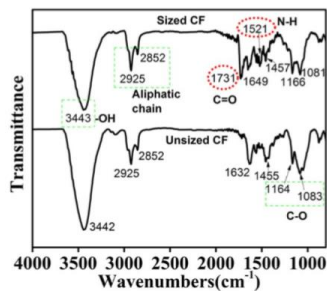
Sampel	Rasio <i>Sizing</i> Resin : Hardener	IFSS (MPa)
<i>As-received</i>	-	65,6
<i>Desized</i>	-	34,2
<i>Sizing</i> Epoksi 1	100 : 0	59,7
<i>Sizing</i> Epoksi 2	100 : 23,7	56,9
<i>Sizing</i> Epoksi 3	100 : 47,3	53,8
<i>Sizing</i> Epoksi 4	100 : 94,7	87,9
<i>Sizing</i> Epoksi 5	100 : 110	68,1

Tabel C.5 Pengaruh konsentrasi *sizing* pada IFSS (Zhang, 2015).

Sampel	Konsentrasi <i>Sizing</i> (%)	IFSS (MPa)
<i>As-received</i>	-	65,4
<i>Desized</i>	-	34,2
<i>Sizing</i> Epoksi 1	0,5	66,4
<i>Sizing</i> Epoksi 2	1	79,1
<i>Sizing</i> Epoksi 3	2	87,9
<i>Sizing</i> Epoksi 4	4	57,4

D. Poliuretan

Hasil Pengujian Karakteristik Kimia Serat Karbon



Gambar D.1 Spektrum FTIR *sizing treatment* serat karbon dengan poliuretan (Zhang, dkk, 2018).

Tabel D.1 Komposisi permukaan serat karbon (Dilsiz dan Wightman, 2000)

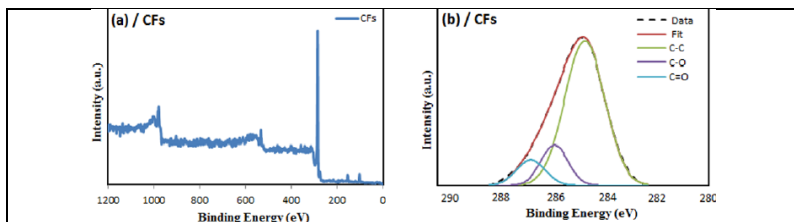
Sampel	C1s	O1s	N1s
<i>Unsize</i>	285,0 eV	533,5 eV	401,4 eV
	91,2%	6,19%	1,24%
<i>PU-sized</i>	285,0 eV	532,8 eV	399,3 eV
	76,1%	20,6%	2,4%

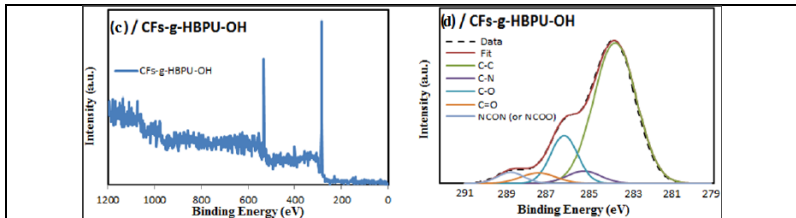
Tabel D.3 Komposisi elemen pada serat karbon (Zhang, dkk, 2018).

	<i>Unsize</i>	Konsentrasi sizing					
		0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1,0%	1,2%
Si2p	2,07	1,31	1,03	0,84	1,17	1,98	1,01
C1s	79,14	78,62	77,71	77,66	76,65	76,6	76,03
N1s	1,14	1,99	3,08	3,22	4,11	2,76	4,28
O1s	17,65	18,09	18,18	18,27	18,07	18,67	18,68
O/C	0,223	0,230	0,234	0,235	0,236	0,244	0,246

Tabel D.4 Hasil Pengujian XPS (Andadeh dan Esfandeh, 2017)

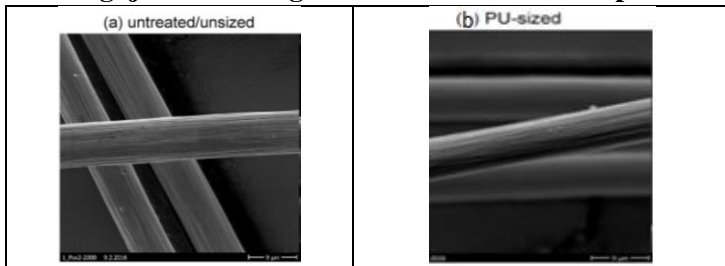
	Sampel	<i>Unsize</i>	<i>PU-sized</i>
<i>Surface Elements (%)</i>	C1s	94,6	74,3
	O1s	5,4	20,6
	N1s	-	5,1
	C-C	85,1	71,7
	C-N	-	3,1
<i>Functional Group (%)</i>	C-O	9,3	18,4
	C=O	5,6	3,3
	NCON	-	3,5
	NCOO	-	-



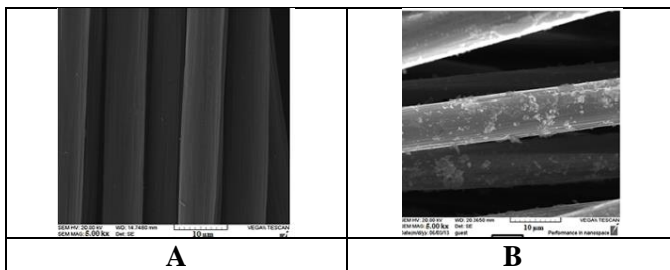


Gambar D.1 Hasil pengujian XPS serat karbon a,b) tanpa perlakuan c,d) *sizing* poliuretan (Andideh dah Esfandeh, 2017).

Hasil Pengujian Morfologi Serat Karbon dan Komposit



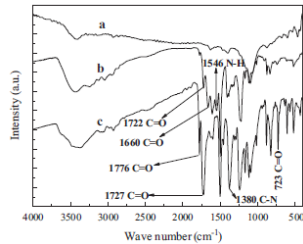
Gambar D.2 Serat karbon a) tanpa perlakuan b) dengan poliuretan *sizing* (Gnadinger, Middendorf, dan Fox, 2016).



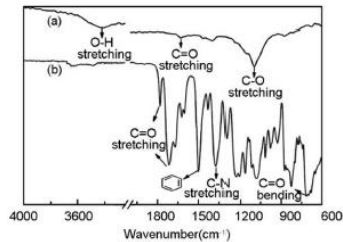
Gambar D.3 Serat karbon A) tanpa perlakuan B) dengan *sizing* *hyperbranched* poliuretan (Andideh dan Esfandeh, 2017).

E. Poliimida

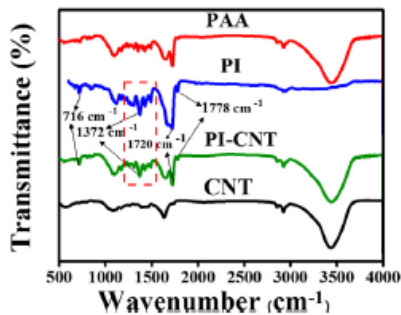
Hasil Pengujian Karakteristik Kimia Serat Karbon



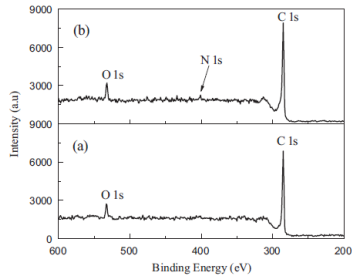
Gambar E.1 Spektra FTIR serat karbon a) tanpa perlakuan b) dengan PAA c) dengan poliimida (He, dkk, 2011)



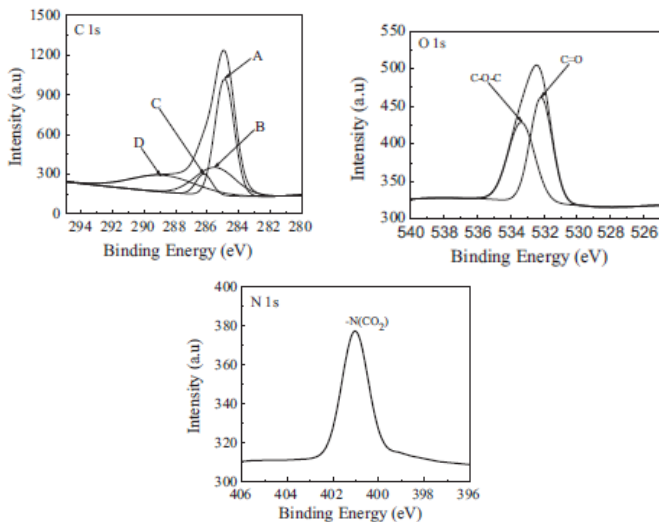
Gambar E.2 Spektra FTIR serat karbon a) tanpa perlakuan b) *sizing* poliimida (Yuan, dkk 2015).



Gambar E.3 Spektra FTIR (Hassan, dkk, 2019)



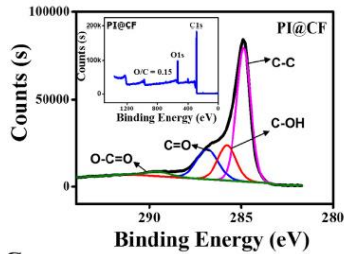
Gambar E.4 Wide scan spektra serat karbon a) tanpa perlakuan b) *sizing* poliimida (He, dkk, 2011)



Gambar E.5 Spektra XPS dari C1s, O1s, dan N1s (He, dkk, 2011)

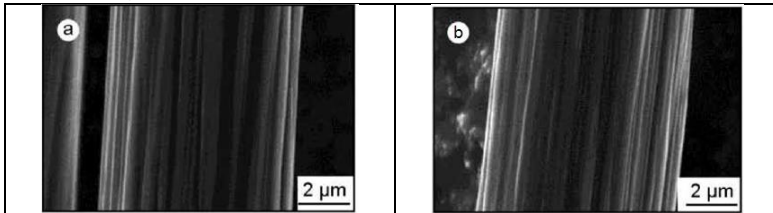
Tabel E.1 Hasil Pengujian XPS (Hassan, dkk, 2019)

	C-C (%)	C-OH (%)	C=O (%)	COOH (%)
<i>Sizing-</i>	57,20	19,46	19,83	3,50
PI	(284,8 eV)	(285,5 eV)	(286,6 eV)	(289,4 eV)

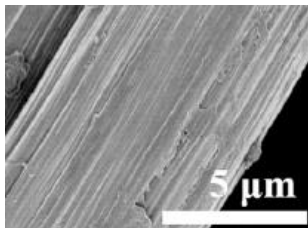


Gambar E.6 Spektra XPS (Hassan, dkk, 2019)

Hasil Pengujian Morfologi Serat Karbon



Gambar E.7 Serat karbon a) tanpa perlakuan b) *sizing* poliimida (Yuan, dkk, 2015)



Gambar E.8 Serat karbon dengan *sizing* poliimida (Hassan, dkk, 2019)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Hardina Putri Kinanty Zulayka. Lahir dari pasangan Hartono dengan Dewi Risnawati di DKI Jakarta pada tanggal 29 April 1997. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan formal di Sekolah Dasar Negeri Pondok Pinang 12 Jakarta Selatan, Sekolah Menengah Pertama Negeri 19 Jakarta Selatan, Sekolah Menengah Atas Negeri 70 Jakarta Selatan. Kemudian penulis melanjutkan Pendidikan di Perguruan Tinggi Negeri tepatnya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS pada tahun 2016 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis sempat menjadi Staff Departemen Dalam Negeri HMMT FTI-ITS 2017/2018 dan Sekeretaris Departemen Dalam Negeri HMMT FTI-ITS 2018/2019. Penulis juga menjadi Steering Committee Kaderisasi HMMT FTI-ITS 2017/2018. Penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ selama kurang lebih satu bulan. Penulis mengakhiri studi S1-nya dengan mengambil bidang Material Inovatif khususnya komposit polimer. Penulis dapat dihubungi melalui alamat *e-mail* dan nomor telepon: hardinaptri@gmail.com dan 085772490714.