

SKRIPSI

**EFEK PENGGURDIAN TERHADAP KERUSAKAN
DELAMINASI KOMPOSIT TENUNAN SERAT RAMI**

YASIN KAMIL Y

D21116004



DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

SKRIPSI
EFEK PENGGURDIAN TERHADAP KERUSAKAN
DELAMINASI KOMPOSIT TENUNAN SERAT RAMI

Disusun dan diajukan oleh:

YASIN KAMIL Y

D21116004

Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

EFEK PENGGURDIAN TERHADAP KERUSAKAN DELAMINASI KOMPOSIT TENUNAN SERAT RAMI

Disusun dan diajukan oleh:

YASIN KAMIL Y

D211 16 004

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Pada tanggal : 25 Mei 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Zulkifli Djafar, MT

Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, MT

NIP. 19650630 199103 1 004

NIP. 19580921 198603 1 003

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST., MT.

NIP. 19720825 200003 1 001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda – tangan dibawah ini:

Nama : Yasin Kamil Y
NIM : D211 16 004
Program Studi : Teknik Mesin
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“EFEK PENGGURDIAN TERHADAP KERUSAKAN DELAMINASI KOMPOSIT TENUNAN SERAT RAMI”

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi/tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi/tesis/disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 25 Mei 2021

Yang menyatakan

Tanda Tangan



Yasin Kamil Y

PERSEMBAHAN

*“ Sebuah mahakarya di masanya yang
dipersembahkan hanya kepada Allah Azzah Wa
Jallah dan makhluknya berupa masa depan
dari seorang anak petani coklat. ”*

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Yasin Kamil Y

Tempat Tanggal Lahir : Mappedeceng, 04 Oktober 1998

Alamat : Perumahan Bumi Kaluku Blok A2, Desa Purna
Karya, Kec. Tanralili, Kab. Maros.

Jenis Kelamin : Laki-laki

Agama : Islam

Whattshap : +62822 9342 5524

E-mail : yasinkamil004@gmail.com

Linkedin : <https://www.linkedin.com/in/yasin-kamil-y-7762481b0>

Hobby : Membaca dan Olahraga

Pengalaman Kerja : Freelancer di Home Industry Springbed
(Oktober 2019 sampai sekarang)
Asisten Laboratorium Mekanika Terpakai
(Januari 2019 – Desember 2020)
Founder E-Juku di Gerakan 1000 Star-up Digital
Indonesia (2019)
PT. WIKA BETON
(Desember 2018 – Januari 2019)
Tim Helpdesk Penerimaan Mahasiswa Baru Unhas
(2018)

Tertarik Pada : Artificial Intelligence (Machine Learning), IoT,
CAD/CAM, Desain Grafis, UAV design, Star-up, Web
Developer & Data analys

Motto : *Stay Hungry, Stay Foolis*

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الَّذِي لَا يَضُرُّ مَعَ اسْمِهِ شَيْءٌ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَهُوَ السَّمِيعُ الْعَلِيمُ

(HR. At Tirmidzi no. 3310)

Alhamdulillah, Tidak pernah lelah lisan penulis memanjatkan syukur dan tahmid kepada Dzat Yang selalu melimpahkan karunia dan anugerah tak terbatas kepada makhluk Nya. Walaupun pada setiap waktu yang melintas, penulis mencoba merenungkan luasnya rahmat dan kasih sayang-Nya, tidak akan pernah berhenti di sebuah penghujung. Shalawat dan salam senantiasa terlimpah kepada kekasih dan junjungan manusia semsta alam, penutup para nabi dan Rasul, Muhammad bin Abdillah bin Abdil Muththalib. Juga kepada keluarga, shahabat, dan setiap insan yang meneladani kehidupan beliau. Alhamdulillah atas hidayah dan inayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Efek Penggurdian terhadap Kerusakan Delaminasi Komposit Tenunan Serat Rami”** yang merupakan salah satu sarat guna menempuh ujian gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dalam penulis skripsi ini banyak rintangan dan tantangan yang dihadapi, namun berkat dan rahmat *Allah azzah wa jallah* segala sesuatu yang sulit dapat menjadi mudah, sehingga skripsi ini dapat dirampungkan, meskipun dalam bentuk yang sederhana. Dengan terealisasinya skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan yang perlu disempurnakan. Oleh karena itu penyusun memohon dengan sangat kritik dan saran guna perbaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih sangat jauh dari kata sempurna, penulis menyadari akan keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki, oleh karena itu besar harapan penulis agar skripsi ini dapat memberi manfaat ilmu pengetahuan khususnya kepada diri penulis sendiri dan umumnya pihak lain. Dalam penyusunan skripsi ini penulis banyak mendapat masukan yang membahagi, baik itu dukungan motivasi dan berupa bimbingan yang sangat berharga dari berbagai pihak mulai dari pelaksanaan hingga penyusunan skripsi ini.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan *jazakumullahu khairan katshira wa barakallahufiik* kepada orang tua tercinta, Ayahanda **Yahya Dg. Liwang**

serta Ibunda **Nurida Dg. Tanang** *rahimahullah* dan Ibunda **Rosmini** untuk segala do'a yang tercurah, kasih sayang yang melimpah dan semangat serta pengorbanan yang tiadatara kepada anak-anaknya.

Dalam kesempatan yang istimewa ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang setinggi-tingginya, *jazakumullahu khairan katshira* kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Zulkifli Djafar, MT selaku pembimbing pertama atas segala bimbingan, arahan, masukan, dan bantuannya selama penyusunan tugas akhir.
2. Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, MT., selaku Dosen Pembimbing II yang juga telah memberikan waktu dan masukan selama proses pengerjaan skripsi ini.
3. Dr.Eng Jalaluddin, ST., MT., selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Dr. Muhammad Syahid, ST, MT, selaku sekretaris Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Dr. Sri Chandrabakty, ST., MT., yang telah banyak meluangkan waktu untuk membagi ilmu dan pengetahuan dalam pengerjaan skripsi ini.
6. Bapak Andi Khairul dan bapak Usman selaku *Laborant* Mekanika Terpakai Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
7. Bapak/Ibu Dosen Fakultas Teknik Departemen Teknik Mesin atas bimbingan dan arahan, didikan, serta motivasi yang telah diberikan selama empat tahun terakhir ini.
8. Seluruh staf dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuannya selama penulis menempuh perkuliahan terutama kepada staf Departemen Teknik Mesin Kak Suri, Pak Iwan, dan Pak Mansur.
9. Sahabat-sahabat seperjuangan COMPREZZOR 2016 yang telah memberi tawa dan canda, menghapus luka serta duka, menjadi penopang saat tugas kuliah melanda dan membagi jawaban saat ujian final merajalela.
10. Saudara tak sedarah Gugus Tugas Percepatan Skripsi Laboratorium Mekanika Terpakai 2016, Firmansyah, Armanzah dan Adi Kusuma Putra yang telah membagi pundak untuk bersandar dalam setiap kondisi dan membantu menutup saku disaat bocor tak sadarkan diri.

11. Gudang Inspirasi Yahya Group, Kakanda Hasbi Yahya, Nur Halimah Yahya, Maulana Yahya, Nur Aisyah Yahya dan Adinda Sahrullah Yahya serta Yusuf Aulia Yahya yang giat menginvestasikan semangat serta materi.

Semoga *Allah Azzah wa Jallah* memberikan balasan yang melipat ganda kepada semua pihak yang telah turut membantu penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini. Akhir kata, penyusun sadar sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik konstruktif dari pembaca demi perbaikan dan sebagai bekal pengetahuan dalam penyusunan-penyusunan berikutnya. Akhirnya, penulis berharap semoga penulisan skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis, para pembaca dan almamater tercinta. *Aamiin*

Gowa, 25 Mei 2021

Penulis

ABSTRAK

YASIN KAMIL Y, Efek *Penggurdian terhadap Kerusakan Delaminasi Komposit Tenunan Serat Rami* (dibimbing oleh Zulkifli Djafar dan Ahmad Yusran Aminy).

Material komposit telah menjadi material komersil yang banyak digunakan, karena memiliki kekuatan yang tinggi pada berat yang rendah serta arah kekuatan yang dapat dikendalikan melalui arah penguat. Seiring dengan perkembangan teknologi, serat alam menjadi opsi sebagai penguat komposit menggantikan serat sintetis. Serat rami menjadi alternatif serat alam dengan kompabilitas yang sangat baik dibandingkan dengan serat alam lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah lapisan penguat dan parameter pemesinan pada hasil penggurdian menggunakan faktor delaminasi. Proses pabrikasi komposit menggunakan metode *hand lay up* dan *compression molding*. Bahan dasar matriks komposit yaitu *Epoxy Resin Bisphenol A* tipe *Epichlorohydrin*. Hasil pencetakan panel komposit berukuran 200 x 200 mm, dengan ketebalan 4 mm. Proses penggurdian dilakukan pada komposit dengan variasi penguat 3, 4 dan 5 lapis menggunakan diameter gurdi 6,8 dan 10 mm. Kecepatan spindel yang digunakan 88, 455 dan 1500 rpm pada variasi *feedrate* 0,05; 0,09 dan 0,15 mm/rev. Hasil analisa menunjukkan faktor delaminasi meningkat seiring dengan penambahan jumlah lapisan penguat, dimana peningkatan faktor delaminasi tertinggi terjadi pada penguat 4 lapis. Faktor delaminasi meningkat secara berturut-turut pada *feedrate* 0,05 hingga 0,15 mm/rev yaitu, 29×10^{-3} , 28×10^{-3} dan 38×10^{-3} untuk sisi masuk serta 115×10^{-3} , 64×10^{-3} dan 49×10^{-3} untuk sisi keluar pada komposit penguat 4 lapis. Kemudian faktor delaminasi meningkat seiring dengan peningkatan diameter gurdi, dimana faktor delaminasi meningkat signifikan pada penggunaan gurdi diameter 8 mm. Pada *feedrate* yang sama, faktor delaminasi meningkat rata-rata sebesar 93×10^{-3} pada sisi masuk serta 75×10^{-3} , 110×10^{-3} dan 126×10^{-3} untuk sisi keluar pada penggunaan diameter gurdi 8 mm. Selanjutnya peningkatan *feedrate* memberikan dampak peningkatan faktor delaminasi, dimana faktor delaminasi tertinggi terjadi pada *feedrate* 0,15 mm/rev disemua sisi penggurdian. Faktor delaminasi dianalisa menggunakan pendekatan metode statistik taguchi dan regresi linear berganda, hasil analisa menunjukkan parameter optimal penggurdian dapat dicapai pada penggurdian komposit dengan penguat 3 lapis, diameter gurdi 6 mm dan kecepatan spindel 88 rpm, hasil analisis menunjukkan parameter ini dapat mereduksi delaminasi sebesar 10,5%. Sedangkan jika ditinjau dari pengaruh antara variabel bebas dan variabel terikat. Parameter input (variabel bebas berpengaruh simultan terhadap variabel bebas dengan tingkat R-square 85,13% pada sisi masuk dan 89,66% pada sisi keluar

Kata Kunci : Penggurdian, Delaminasi, Komposit, Serat Rami, Serat Alam

ABSTRACT

YASIN KAMIL Y, *Effects of Delamination in drilling ramie fibre reinforced Woven Composites* (supervised by oleh Zulkifli Djafar dan Ahmad Yusran Aminy).

Composite materials have become a widely used commercial material because they have high strength at low weight and can be controlled through the reinforcing direction. Along with the development of technology, natural fibres have become an option as reinforcement for synthetic replacement fibre composites. Ramie fibre is an alternative to natural fibres with excellent compatibility compared to other natural fibres. This study aims to analyze the effect of variations in the reinforcing layer and machining parameters on the drilling results using delamination factors. The composite manufacturing process uses hand lay-up and compression moulding methods. The basic material for the composite matrix is Epoxy Resin Bisphenol-A type Epichlorohydrin. The result of a composite panel printing measuring 200 x 200 mm, with a thickness of 4 mm. The dredging process was carried out on composites with variations of reinforcement 3, 4 and 5 layers using a diameter of 6,8 and 10 mm cores. The spindle speeds used were 88, 455 and 1500 rpm at a variation of the feed rate of 0.05; 0.09 and 0.15 mm / rev. The analysis results show that the delamination factor increases with the addition of the number of reinforcing layers, where the highest increase in delamination factor occurs in 4 layers of reinforcement. The delamination factor increased respectively at a feed rate of 0.05 to 0.15 mm/rev namely, 29×10^{-3} , 28×10^{-3} dan 38×10^{-3} for the inlet, and 115×10^{-3} , 64×10^{-3} for the exit side of the 4 layers reinforcing composite. Then the delamination factor increases with the increase in the diameter of the gourd, where the delamination factor increases significantly with the use of 8 mm diameter drill bits. At the same feed rate, the delamination factor increased mean by 93×10^{-3} for the inlet side as well as 75×10^{-3} , 110×10^{-3} dan 126×10^{-3} for the exit side using 8 mm diameter drill bits. Furthermore, the increase in federal has the impact of increasing the delamination factor, where the highest delamination factor occurs at the feed rate of 0.15 mm/rev in all aspects of drilling. The delamination factor was analyzed using the Taguchi statistical method approach and multiple linear regression, the results of the analysis showed that the optimal dredging parameters could be achieved in the composite dredging with 3 layers of reinforcement, 6 mm diameter and spindle speed of 88 rpm, the results of the analysis showed that this parameter could reduce delamination by 10,5%. Meanwhile, if viewed from the influence between the independent variable and the dependent variable. Input parameters (independent variables have a simultaneous effect on the independent variables with an R-square level of 85,13% on the entry side and 89,66% on the exit side

Keywords: Drilling, Delamination, Composite, Ramie Fiber, Natural Fiber

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR).....	iii
PERSEMBAHAN.....	v
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	vi
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
ABSTRAK.....	x
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Batasan Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Tinjauan Umum Tentang Serat Rami.....	6
2.1.1. Karakteristik Tanaman Rami.....	7
2.1.2. Proses Pabrikasi Serat Rami.....	8
2.1.3. Aplikasi Serat Rami.....	12
2.2. Resin Epoxy.....	14
2.3. Tinjauan Umum Tentang Komposit.....	17
2.3.1. Unsur Pembentuk Komposit.....	19
2.3.2. Rule Of Mix.....	23
2.3.3. Serat alami (Natural fibre).....	24

2.4. Tinjauan Umum Tentang Parameter Penggurdian	27
2.4.1. Pengertian Penggurdian	27
2.4.2. Drill Bits	31
2.4.3. Candlestick drill (Brad and Spur)	33
2.5. Tinjauan Tentang Delaminasi	34
2.6. Metode Taguchi	40
2.7. Metode Regresi Linear	41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	42
3.1. Tempat Penelitian	42
3.2. Alat dan Bahan.....	42
3.2.1. Alat yang digunakan.....	42
3.2.2. Bahan yang digunakan.....	46
3.3. Metode Penelitian	47
3.4. Pelaksanaan Penelitian	48
3.4.1. Persiapan alat dan bahan.....	48
3.4.2. Pengolahan serat rami.....	48
3.4.3. Proses pencetakan panel komposit	48
3.4.4. Pembuatan spesimen uji	50
3.4.5. Jumlah spesimen.....	52
3.4.6. Analisis kerusakan delaminasi.....	52
3.4.7. Diagram alir penelitian	55
3.4.8. Pengukuran Variable / Parameter	56
3.5. Analisis Data	56
3.6. Analisa Data menggunakan Metode Taguchi.....	56
3.7. Uji Hipotesa menggunakan Regresi Linear Berganda.....	56
3.7.1. Uji Koefesien Determinan (R^2).....	56
3.7.2. Uji Simultan (Uji f).....	57
3.7.3. Uji parsial (Uji t).....	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1. Hasil Perhitungan Faktor Delaminasi pada Variasi Lapisan & Parameter Penggurdian.....	58

4.2. Hasil Perhitungan Faktor delaminasi.....	60
4.2.1. Hasil Perhitungan Sisi Masuk Penggurdian	60
4.2.2. Hasil Perhitungan Sisi Keluar Penggurdian	61
4.3. Analisa Faktor Delaminasi Akibat Variasi Jumlah Lapisan (ply) dan Laju Pemakanan (Feedrate).....	63
4.3.1. Analisa Faktor Delaminasi pada Diameter Gurdi 6 mm	63
4.3.2. Analisa Faktor Delaminasi pada Diameter Gurdi 8 mm	68
4.3.3. Analisa Kerusakan Delaminasi pada Diameter Gurdi 10 mm.....	73
4.4. Analisa Kerusakan Delaminasi Akibat Variasi Diameter Pahat Gurdi	78
4.4.1. Analisa Kerusakan Delaminasi pada penguat 3 lapis	78
4.4.2. Analisa Kerusakan Delaminasi pada penguat 4 lapis	82
4.4.3. Analisa Kerusakan Delaminasi pada penguat 5 lapis	85
4.5. Analisis dengan Menggunakan Metode Taguchi	89
4.6. Analisis dengan menggunakan Metode Regresi	93
BAB V PENUTUP.....	99
5.1. Kesimpulan.....	99
5.2. Saran.....	100
DAFTAR PUSTAKA	101
LAMPIRAN 1	108
LAMPIRAN 2	109
LAMPIRAN 3	110
LAMPIRAN 4.....	111
LAMPIRAN 5	121
LAMPIRAN 6.....	139
LAMPIRAN 7.....	140

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Kandungan serat rami mentah.....	10
Tabel 2. 2. Klasifikasi proses degumming	10
Tabel 2. 3. Klasifikasi proses degumming (retting) (Lanjutan).....	11
Tabel 2. 4. Karakteristik jenis pengikat	21
Tabel 2. 5. Jenis-jenis serat alam	24
Tabel 2. 6. Sifat mekanik serat alam	26
Tabel 4. 1. Merupakan nilai rata-rata hasil perhitungan faktor delaminasi pada penggurdian komposit tenunan serat rami.	58
Tabel 4. 2. Level variabel bebas.....	89
Tabel 4. 3. orthogonal array L9 berdasarkan metode taguchi.....	89
Tabel 4. 4. Nilai respon delaminasi sisi masuk terhadap nilai rata-rata.....	90
Tabel 4. 5. Nilai respon delaminasi sisi keluar terhadap nilai rata-rata	90
Tabel 4. 6. Analysis of variance untuk rata-rata pada diameter 10.....	93
Tabel 4. 7. R-Square.....	94
Tabel 4. 8. Koefesien Regresi	95
Tabel 4. 9. Analysis of variance untuk rata-rata pada diameter 8.....	95
Tabel 4. 10. R-Square.....	96
Tabel 4. 11. Analysis of variance untuk rata-rata pada diameter 6.....	97
Tabel 4. 12. R-Square.....	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Tanaman Rami	7
Gambar 2. 2. Hasil produk cover knalpot dengan penguat serat rami	14
Gambar 2. 3. Permintaan resin epoksi global berdasarkan sektor	16
Gambar 2. 4. Bentuk-bentuk Penguat	21
Gambar 2. 5. Struktur komposit sandwich.....	23
Gambar 2. 6. struktur lapisan komposit laminasi.....	23
Gambar 2. 7. Aplikasi komposite pada pesawat Airbus	28
Gambar 2. 8. Cutting force dalam proses penggurdian.....	30
Gambar 2. 9. Klasifikasi drill bits	32
Gambar 2. 10. Geometri gurdi (a) Twist (b) candlestick (c) core-center drills.....	33
Gambar 2. 11. Geometri gurdi candlestick	33
Gambar 2. 12. Mekanisme penggurdian candlestick drill.....	34
Gambar 2. 13. Evaluasi permukaan hasil penggurdian (a) delaminasi pada lubang gurdi (b) delaminasi dengan pembesaran 50 kali	35
Gambar 2. 14. Mekanisme peel-up a tampak depan; b pandangan bidang.....	36
Gambar 2. 15. Mekanisme delaminasi push-down tanpa momen tepi	37
Gambar 2. 16. Mekanisme delaminasi push-up dengan momen tepi	37
Gambar 2. 17. Mekanisme terbentuknya delaminasi (a) splintering, (b) Konsentrasi tegangan pada lamina sisi keluar pahat gurdi	38
Gambar 2. 18. Luas area nominal dan Dmax.....	40
Gambar 3. 1. Timbangan digital	42
Gambar 3. 2. Oven listrik.....	42
Gambar 3. 3. Wadah kedap udara	43
Gambar 3. 4. Alat press cetakan.....	43
Gambar 3. 5. Cetakan baja	43
Gambar 3. 6. Gelas Ukur PYREX 100 ml	43
Gambar 3. 7. Dongkrak hidrolik	44
Gambar 3. 8. Gelas plastik	44
Gambar 3. 9. Scroll Saw	44
Gambar 3. 10. Gurdi “brad and spurs”.....	44

Gambar 3. 11. mesin gurdi TPR 1100.....	45
Gambar 3. 12. Laptop Axioo neon.....	45
Gambar 3. 13. Tampilan muka software Image-Pro PLUS	45
Gambar 3. 14. Tampilan muka software Minitab	46
Gambar 3. 15. Serat Rami	46
Gambar 3. 16. Resin Epoksi dan Epoksi hardener.....	46
Gambar 3. 17. Mold realese wax merk "Mirror glaze"	47
Gambar 3. 18. Panel Komposit	50
Gambar 3. 19. Komposisi jumlah lapisan pada panel komposit	51
Gambar 3. 20. Pola ASTM D 5766/D 5766M – 02	51
Gambar 3. 21. Hasil pemotongan panel komposit menjadi spesimen uji, (a) gurdi 6 mm, (b) diameter gurdi 8 mm, (c) diameter gurdi 10 mm	52
Gambar 3. 22. Pengambilan gambar salahsatu sisi penggurdian.....	53
Gambar 3. 23. pengaturan format gambar scan	53
Gambar 3. 24. pengaturan format gambar scan	53
Gambar 3. 25. pengukuran diameter maksimum (delaminasi)	54
Gambar 3. 26. Diagram alir penelitian	55
Gambar 4. 1. Gambar 4.1. Hubungan faktor delaminasi sisi masuk terhadap jumlah lapisan penguat pada diameter 6 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm.	64
Gambar 4. 2. Hubungan faktor delaminasi sisi keluar terhadap jumlah lapisan penguat pada diameter gurdi 6 kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm.	66
Gambar 4. 3. Hubungan faktor delaminasi sisi masuk terhadap jumlah lapisan penguat pada diameter 8 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm.	69
Gambar 4. 4. . Hubungan faktor delaminasi sisi keluar terhadap jumlah lapisan penguat pada diameter 8 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm.....	71

Gambar 4. 5. Hubungan faktor delaminasi sisi masuk terhadap jumlah lapisan penguat pada diameter 10 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm	74
Gambar 4. 6. . Hubungan faktor delaminasi sisi keluar terhadap jumlah lapisan penguat pada diameter 10 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm.....	76
Gambar 4. 7. Grafik hubungan antara faktor delaminasi sisi masuk dan diameter gurdi terhadap komposit serat rami pada jumlah penguat 3 lapis dan kecepatan spindle (a) 88 rpm, (b) 455 rpm & (c) 1500 rpm.	79
Gambar 4. 8. Grafik hubungan antara faktor delaminasi sisi keluar dan diameter gurdi terhadap komposit serat rami pada jumlah penguat 3 lapis dan kecepatan spindle (a) 88 rpm, (b) 455 rpm & (c) 1500 rpm	80
Gambar 4. 9. Grafik hubungan antara faktor delaminasi sisi masuk dan diameter gurdi terhadap komposit serat rami pada jumlah penguat 4 lapis dan kecepatan spindle (a) 88 rpm, (b) 455 rpm & (c) 1500 rpm.	82
Gambar 4. 10. Grafik hubungan antara faktor delaminasi sisi keluar dan diameter gurdi terhadap komposit serat rami pada jumlah penguat 4 lapis dan kecepatan spindle (a) 88 rpm, (b) 455 rpm & (c) 1500 rpm.....	84
Gambar 4. 11. Grafik hubungan antara faktor delaminasi sisi masuk dan diameter gurdi terhadap komposit serat rami pada jumlah penguat 5 lapis dan kecepatan spindle (a) 88 rpm, (b) 455 rpm & (c) 1500 rpm.....	86
Gambar 4. 12. Grafik hubungan antara faktor delaminasi sisi keluar dan diameter gurdi terhadap komposit serat rami pada jumlah penguat 5 lapis dan kecepatan spindle (a) 88 rpm, (b) 455 rpm & (c) 1500 rpm	87
Gambar 4. 13. Hubungan antara faktor dengan respon pada delaminasi sisi masuk...	91
Gambar 4. 14. Hubungan antara faktor dengan respon pada delaminasi sisi keluar ...	92
Gambar 4. 15. Grafik Probablitas normal diameter 10 mm.....	94
Gambar 4. 16. Grafik Probablitas normal diameter 8 mm.....	96
Gambar 4. 17. Grafik Probablitas normal diameter 6 mm.....	98

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 Dokumentasi proses pra cetak dan pembuatan panel komposit	108
LAMPIRAN 2 Dokumentasi pemotongan panel, proses penggurdian dan proses scan.....	109
LAMPIRAN 3 Dokumentasi proses visualisasi data hasil scan	110
LAMPIRAN 4 Visualisasi bentuk kerusakan pasca penggurdian	111
LAMPIRAN 5 Data hasil pengukuran	121
LAMPIRAN 6 Grafik uji normalitas.....	139
LAMPIRAN 7 Data hasil regresi	140

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penggunaan material komposit semakin banyak ditemui pada berbagai bidang industri seperti industri otomotif, peralatan olahraga maupun peralatan militer. Banyaknya penggunaan material komposit dikarenakan adanya perbedaan karakteristik dari material komposit yang tidak ditemui pada material konvensional. Kelebihan yang ditawarkan dari material komposit dibandingkan dengan material konvensional adalah kemampuan terhadap ketahanan korosi dan keausan yang tinggi, sifat mampu bentuk yang baik, kekuatan yang tinggi pada berat yang rendah, serta arah kekuatan yang dapat dikendalikan melalui arah penguat yang digunakan.

Akhir-akhir ini komposit dengan penguat serat alam menjadi suatu hal yang banyak dikaji karena meningkatnya pemahaman masyarakat umum untuk mengurangi jejak karbon dan penggunaan bahan yang tidak alami yang dapat menghasilkan peningkatan limbah. Pengaplikasian dari serat alam ini sendiri dapat diperoleh dengan memilih jenis serat, matriks, aditif dan metode produksi yang sesuai karena selain kompleksitas struktur serat bahkan tampilan mekanis yang berbeda dapat diperoleh pada serat yang sama walaupun dengan pengikat yang berbeda (Du dkk 2015). Di lain sisi material komposit memiliki kelemahan diantaranya adalah proses pemesinan sulit dan tidak dapat didaur ulang sehingga memerlukan teknologi yang tinggi dan biaya untuk mendapatkan hasil yang baik.

Pada proses pemesinan material komposit seperti pengurdian memiliki beberapa masalah yang timbul yaitu diantaranya adalah *matrix cratering*, *fiber pull-out*, kerusakan termal dan delaminasi. Ketidak tepatan dalam pemilihan parameter proses pemesinan yang digunakan adalah salah satu penyebab dari timbulnya masalah tersebut. Dari beberapa masalah pada pengurdian material komposit, delaminasi menjadi masalah utama yang paling sering timbul (Ilham dan Mufarrih, 2018a). Delaminasi terjadi karena beberapa faktor seperti perbedaan tegangan interlaminar yang tinggi dan geometri pahat yang digunakan serta parameter pemesinan yang digunakan. Dengan begitu deliminasi merupakan salah satu faktor yang penting dalam

penentuan metode atau parameter yang digunakan karena hasil penggurdian dengan parameter yang kurang tepat akan mengurangi kualitas lubang dan membuat kurang optimalnya struktur mekanis (Chandrabakty dkk 2019).

Dari penelitian sebelumnya telah banyak peneliti yang menyelidiki berbagai parameter pemesinan untuk meminimalisir pertumbuhan kerusakan delaminasi dalam komposit serat alam (NFRC). Aravindh dan Umanath, (2015) melakukan investigasi efek pemesinan pada delaminasi komposit matriks epoxy dengan menggunakan serat *jute* pada variasi kecepatan *spindel speed* 1000, 2000 dan 3000 rpm dan diameter gurdi 6, 8, dan 10 mm pada laju umpan/*feed rate* 50, 150, dan 250 mm/min. Investigasi dilakukan untuk melihat parameter pemesinan yang optimal untuk mereduksi delaminasi pada JFRP. Investigasi pada JFRP juga dilakukan oleh Ahmed dan Kumar, (2018) dengan tambahan *ceramic fillers* (SiC dan Al₂O₃) pada komposit penguat 8 lapis dan *spindel speed* 200, 500, dan 1000 rpm menggunakan diameter gurdi 10 mm. Penggurdian dilakukan dengan *feed rate* 0,13; 0,36 dan 0,71 mm/rev untuk mengetahui efek parameter penggurdian dari variasi yang diberikan pada *trush force*, *torsi* dan kualitas lubang dari penambahan *filler*.

Selain investigasi delaminasi pada JFRP, investigasi pada serat alam lainnya juga dilakukan oleh Nasir dkk (2018) menggunakan 6 lapis serat *flax* dengan matriks epoxy untuk mengetahui potensi penggunaan serat alam pada aplikasi non-struktural dari pada serat sintetis. Investigasi dilakukan menggunakan variasi parameter pemesinan dengan kecepatan spindel 3000 dan 6000 rpm serta *feed rate* 0,16 dan 0,24 mm/rev dengan menggunakan *twist drill* dan *step drill*. Penelitian dilakukan untuk menentukan *critical feed rate* dan korelasi *trush force* pada laju delaminasi komposit serat *flax* (FFRP) pada *feed rate* 0,8; 0,16; 0,24; 0,32; 0,40 mm/rev. Sedangkan Maleki dkk (2018b) menggunakan 16 lapis serat *flax* dan matriks epoxy *bisphenol F* (JER 807) serta *Jeffamine hardener D-230* dengan 3 tipe geometri gurdi *twist drill*, *corodrill 854* dan *corodrill 856* pada *feed rate* dan *spindel speed* masing 0,05; 0,125; 0,2 mm/rev dan 500, 1500, 2500 rpm. Investigasi dilakukan untuk mengetahui hubungan geometri gurdi dengan parameter penggurdian pada FFRP untuk mereduksi efek delaminasi.

Penelitian serat alami juga dilakukan oleh (Suhaily dkk 2018) dengan menggunakan serat *kenaf* dan matriks epoxy untuk memilih parameter penggurdian

yang tepat agar menghasilkan lubang yang berkualitas dan meminimalisir kerusakan komposit dengan menggunakan diameter gurdi 6, 9, dan 12 mm serta *feed rate* 0,1; 0,2 dan 0,3 mm/rev pada variasi *cutting speed* 20, 45, 70 mm/min.

Dalam perkebangan serat alam itu sendiri ada banyak serat alam yang dapat dimanfaatkan serta mempunyai karakteristik masing-masing, salah satu serat yang mempunyai kemampuan baik dibanding serat alam yang lainnya adalah serat rami (*boehmeria nivea goud*). Serat rami mempunyai keunggulan seperti kekuatan tarik, daya serap terhadap air, tahan terhadap kelembapan dan bakteri, tahan terhadap panas serta peringkat nomor dua setelah sutra dibandingkan serat alam yang lainnya dan lebih ringan dibanding serat sintetis dan ramah lingkungan (Purboputro dan Hariyanto, 2017) karena keunggulan tersebut mayoritas penelitian tentang serat rami yang digunakan sebagai penguat komposit polimer ditargetkan terutama pada aplikasi bahan teknik (Dudik 2015).

Penelitian parameter permesinan pada komposit serat alam rami juga telah dilakukan oleh Chandrabakty dkk (2019) dengan menggunakan matriks polyesters YUKALAC @ 157 BQTN-EX dan 6 lapisan penguat serat rami untuk mengoptimalkan dan menganalisa efek dari parameter pemesinan pada kerusakan delaminasi yang dihasilkan dari penggurdian komposit dengan diperkuat anyaman serat rami. Pada penelitian ini investigasi dilakukan pada parameter penggurdian seperti *spindel speed* 93, 443, dan 1420 rpm sedangkan *feed rate* 0,1; 0,18 dan 0,24 mm/rev dengan diameter gurdi 4, 6, 8, dan 10 mm. Parameter optimal dievaluasi dengan menggunakan metode taguchi dengan analisa pengaruh pada tiap parameter terhadap faktor delaminasi dijelaskan menggunakan metode *analysis of variance* (ANOVA).

Maka hal ini yang mendasari untuk melakukan penelitian yang berjudul **“Efek Penggurdian terhadap Kerusakan Delaminasi Komposit Tenunan Serat Rami”**

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang diuraikan diatas, maka yang menjadi rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan terhadap kerusakan delaminasi pada pengguridian komposit tenuna serat rami?
2. Bagaimana pengaruh diameter gurdi terhadap kerusakan delaminasi pada pengguridian komposit tenuna serat rami?
3. Bagaimana pengaruh *feedarte* terhadap kerusakan delaminasi pada pengguridian komposit tenuna serat rami?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas maka ditentukan tiga tujuan pada penelitian ini, yaitu:

1. Untuk mengetahui pengaruh jumlah lapis terhadap kerusakan delaminasi pada pengguridian komposit tenuna serat rami.
2. Untuk mengetahui pengaruh diameter gurdi terhadap kerusakan delaminasi pada pengguridian komposit tenuna serat rami.
3. Untuk mengetahui pengaruh *feedrate* terhadap kerusakan delaminasi pada pengguridian komposit tenuna serat rami.

1.4. Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat berkontribusi dalam perkembangan ilmu dan teknologi manufaktur bidang rekayasa material khususnya komposit alam.
2. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan pertimbangan ataupun acuan dalam memilih jumlah lapisan penguat dan parameter pemesinan di bidang industri manufaktur dan lain-lain.

1.5. Batasan Penelitian

Agar tujuan yang diinginkan dapat dicapai dengan maksimal, maka penelitian ini dibatasi beberapa hal yaitu sebagai berikut:

1. Serat rami yang digunakan sebagai penguat (*filler*) komposit.
2. Matrik yang digunakan sebagai perekat komposit yaitu *Epoxy Resin Bisphenol A –Epichlorohydrin* dan *Epoksi Hardener* jenis *Polyamide Resins*.
3. Pengukuran kerusakan delaminasi hanya di dilakukan pada sisi masuk dan sisi keluar pahat gurdi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum Tentang Serat Rami

Tanaman rami (*Boehmeria nivea*) merupakan tanaman tahunan yang mudah tumbuh dan berkembang baik di daerah tropis. Rami banyak dibudidayakan di Jepang, India dan Malaya, tetapi juga di Queensland, Mauritius, Camerouns, Barat india, Meksiko, dan negara-negara selatan di Utara Amerika, Eropa Selatan (Jose, Rajna dan Ghosh, 2016). Rami merupakan tanaman yang serba guna dan tahan terhadap penyakit dan hama, serta dapat mendukung pelestarian lingkungan (Dey, 2018). Dalam hal tertentu serat rami mempunyai keunggulan dibandingkan serat yang lainnya seperti kekuatan tarik, daya serap terhadap air, tahan terhadap kelembapan dan bakteri, tahan terhadap panas serta peringkat nomor dua setelah sutra dibandingkan serat alam yang lainnya dan lebih ringan dibanding serat sintetis dan ramah lingkungan (Purboputro dan Hariyanto, 2017). Hasil penelitian menunjukkan bahwa serat rami dapat digunakan sebagai suplemen kapas atau dijadikan campuran dengan bahan serat lainnya baik serat alami maupun sintetis. Oleh karena itu, keberhasilan pengembangan tanaman rami akan dapat membantu dalam menghemat devisa negara atau bahkan menggantikan tambahan devisa karena komoditas rami laku dipasaran pasar internasional (M. Subandi, 2017).

Serat yang diperoleh dari batang tanaman rami (Purboputro dan Hariyanto, 2017), dimana sejarah awal diketahui dari beberapa pembungkus mumi dari tahun 500–3300 SM telah menggunakan serat rami. Namun tidak ada catatan asli mengenai pemanfaatan serat rami di Mesir, berbagai sumber menyebutkan bahwa rami merupakan komoditas tanaman asli dari Cina yang telah digunakan sebagai serat tekstil di Cina dan Asia Selatan selama berabad-abad (Du, Yan dan Kortschot, 2015). Hal ini didukung oleh M. Subandi (2017) menyebutkan bahwa baru pada awal abad pertengahan serat rami secara luas dipergunakan di Eropa dengan nama *China grass* dan pakaian yang dibuat dari benang serat tersebut disebut *grass linen*.

Serat rami diperoleh dari bagian kulit batang (ribbon). Di dalam batang sel-sel serat diikat satu sama lain oleh getah (*gum/zat perekat*) membentuk sambung menyambung hingga panjangnya dapat mencapai 90-180 cm. keberadaan getah

tersebut maka dalam pengolahannya perlu dilakukan proses *degumming* yaitu pemisahan serat satu sama lain dan karena zat perekat tersebut tidak larut dalam air, maka proses tersebut dilakukan secara kimiawi (Ramesh, 2018). Serat rami sifat-sifatnya sebagai berikut berwarna putih, mudah diiberi warna, kuat dan kekuatannya tidak mudah berubah, tidak mudah busuk, apabila dibandingkan serat nabati yang lain serat rami memiliki kekuatan daya tarik lebih besar dari pada serat linnen, sutra dan 7 kali kekuatan serat kapas. Daya serap terhadap kelembaban 12 %, berarti lebih tinggi dari pada daya serap kapas yang hanya 8% (M. Subandi, 2017). Serat ini tahan terhadap serangan bakteri dan kekuatannya meningkat ketika dibasahi, serta mampu menyerap air lebih tinggi jika dibandingkan dengan serat kapas (Banerjee dkk, 2015).

2.1.1. Karakteristik Tanaman Rami

Tanaman rami berpostur tegak dan biasanya tidak bercabang. Jika mengalami gangguan pertumbuhannya, misalnya batangnya patah karena angin atau gangguan fisik, tunas baru dapat tumbuh di bawahnya. Serat yang diperoleh dari bagian lapisan kulit luar (*blast*) (M. Subandi, 2017). Daun rami berwarna hijau di permukaan atasnya dan permukaan bawahnya berwarna putih perak. Permukaan daun berbulu halus dan memiliki memiliki tinggi tanaman rata-rata 1,8 meter dengan ketebalan batang 1,2 cm (Djafar, Renreng dan Jannah, 2018). Gambar tanaman rami dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2. 1. Tanaman Rami (Subandi 2015)

Budidaya tanaman rami paling cocok di tanah liat atau berpasir tanah lempung dengan pH 5,5 hingga 7,0. Iklim lembab yang hangat dengan curah hujan tahunan yang baik dari 1500-3000 mm. Suhu optimal untuk pertumbuhan rami adalah 25°C - 35°C. Dapat ditanam sepanjang tahun di lahan irigasi, Rami adalah sebuah tanaman tahunan dan dapat dipanen hingga enam tahun. Biaya bahan tanam, biaya tanam dan tanah persiapan hanya diperlukan untuk tahun pertama. Dari tahun berikutnya dan seterusnya tidak ada biaya tambahan untuk tujuan ini. Tanaman rami biasanya diperbanyak dengan sarana rimpang, pemotongan batang dan benih (Ray dkk, 2017).

2.1.2. Proses Pabrikasi Serat Rami

Rami adalah tanaman tahunan. Tanaman ini kuat dan tumbuh dengan baik di iklim hangat (Dey, 2018). Rami dipanen dua hingga empat kali panen per tahun dimungkinkan tergantung pada iklim, tetapi di bawah kondisi pertumbuhan yang baik rami dapat dipanen hingga enam kali per tahun. Rami dipanen ketika batang bawah menguning dan tangkai baru mulai muncul dan dapat juga pemanenan dilakukan sesaat sebelum atau sesudah mulai berbunga karena ada penurunan pertumbuhan tanaman dan batas maksimal bobot serat pada tahap ini. Waktu panen ini penting karena hasil serat berkurang jika belum matang atau siap panen (M. Subandi, 2017).

Setelah dipanen batang rami melalui beberapa proses pabrikasi sehingga menjadi sebuah serat. Adapun proses pabrikasi serat rami terbagi menjadi 3 bagian yaitu dekortikasi, *degumming* dan *spinning*.

Dekortikasi

Serat rami dipisahkan dari batang dengan proses dekortikasi. Ini biasanya dilakukan dengan tangan, prosesnya terdiri dari mengupas atau memukul kulit pohon (rami) dari tangkai segera setelah panen. Serat rami tidak dapat diekstraksi secara tepat menggunakan *retting* konvensional seperti serat *jute* karena kehadiran sejumlah zat bergetah/*gum*. *Pektin* dan *hemiselulosa* merupakan bagian utama dari getah yang tidak larut dalam air, rami diekstraksi pada saat rami batang masih segar karena sangat sulit mengekstrak serat batang kering menggunakan mesin dekortikasi. Mesin dekortikasi beroperasi menggunakan prinsip *raspador* dan bekerja pada kecepatan 600 sampai 700 rpm dengan bantuan mesin diesel atau motor listrik (Ray dkk, 2017).

Mesin dekortikasi menghilangkan kulit luar, menghancurkan dan menghilangkan seluruh bagian kayu bersama dengan getah dan *waxes*. Serat yang diekstraksi dicuci pada air mengalir dan digantung selama 1-3 hari, serat megering dan memutih dengan bantuan angin dan sinar matahari. Pengeringan dilakukan sedini mungkin untuk menghindari serangan jamur dan bakteri, setelah di jemur serat rami disikat untuk mengurangi getah dan zat lainnya yang menempel pada serat. Produk yang diperoleh melalui mesin dekortikasi serat mentah masih mengandung getah 19-30 %, namun demikian serat terbebas dari jaringan *cortical* (Ray dkk, 2017). Hasil dari dekoritkasi menjadi sekelompok serat yang masih kasar yang lazim disebut sebagai *China grass* (Novarini dkk, 2015).

Degumming

Proses *degumming* (*retting*) merupakan tahapan paling krusial pada proses pengolahan batang basah rami dimana rami lebih sulit diproses dari pada serat lain karena rami disatukan oleh getah/*gum* yang tidak mudah terurai, getah sebagai metabolit sekunder dihasilkan dari disintegrasikan selulosa (Banerjee S dkk, 2018). Untuk menghilangkan getah tersebut maka proses *retting* umumnya digunakan untuk pengolahan serat rami. Pemrosesan harus dimulai sesegera mungkin setelah batang dipotong, jika tidak getah akan mengeras dan menjadi sulit untuk dihilangkan (Djafar dkk, 2018). Proses ini sangat menentukan kualitas akhir serat siap pintal. Batang basah rami mengandung bahan bergetah (*gum*) antara 20% hingga 35% bergantung pada varietas tanaman. Getah ini sebagian besar terdiri atas *pektin* dan *hemiselulosa* (Li dkk, 2016). Kandungan *pektin* pada rami cukup tinggi yaitu 3% hingga 27%, padahal kandungan *pektin* pada serat kapas hanya 0,9%. Hal ini yang menyebabkan serat rami cenderung lebih kaku jika dibandingkan kapas. Persyaratan kandungan residu getah maksimum pada bahan tekstil dari serat rami adalah 1,5-2,5%. (Novarini dkk, 2015). *Pektin* dan *hemiselulosa* ini sebagian besar tidak larut dalam air dan harus demikian dilangkan sebelum serat dapat dipintal secara mekanis untuk menghasilkan benang (Li dkk, 2016).

Degumming bertujuan untuk menghilangkan getah pada serat rami, secara umum *degumming* dilakukan untuk meghilangkan *hemiselulosa* yang merupakan setengah

dari komponen getah. Tabel 2.1 memperlihatkan kandungan dari serat rami. Ada banyak proses degumming yang digunakan diberbagai belahan dunia, dimana serat dihasilkan melalui proses kimia maupun mikroba (Ray dkk, 2017)

Tabel 2. 1. Kandungan serat rami mentah

Kandungan mentah (%)	Mulianingrum dkk (2019)	Li dkk (2016)	Banerjee dkk (2015)	Du dkk (2015)
Lilin	-	1 - 2	-	0.3
Air terlarut	-	5 – 8	-	-
Pektin	2	4 - 5	5	1.9
Lignin	1	0,8 - 1,5	0.50	0.6 – 0.7
Hemicellulose	5 - 13	14 - 16	3.90	13.1 – 16.7
α -cellulose	69 - 91	68 - 75	86.90	68.6 – 76.2
Abu	2 - 4	-	-	-

Klasifikasi proses *degumming* dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 (Ramesh, 2018).

Tabel 2. 2. Klasifikasi proses degumming

<i>Degumming (retting)</i>	Kelebihan atau kekurangan
Biologi alami (embun atau <i>dew retting</i>)	Proses sangat lama (3-6 minggu), kualitas serat yang dihasilkan tidak konsisten, berisiko menurunkan kekuatan serat
Biologi alami (<i>cold water retting</i>)	Kualitas serat tinggi, proses cukup lama (7-14 hari), menghasilkan limbah organik berbau akibat fermentasi gas
Biologi buatan (<i>hot water retting</i>)	Proses lebih singkat (3-5 hari), kualitas serat baik (bersih dan homogen), pencemaran tinggi
Biologi (<i>enzyme retting</i>)	Proses singkat (2-24 jam), tidak mengakibatkan kerusakan serat, biaya proses tinggi sehingga aplikasi baru sebatas skala pilot

Mekanika (<i>green retting</i>)	Proses lebih singkat (2-3 hari maks. 10 hari), kualitas serat kasar
-----------------------------------	---

Tabel 2. 3. Klasifikasi proses degumming (*retting*) (Lanjutan)

<i>Degumming (retting)</i>	Kelebihan atau kekurangan
Fisika (<i>steam explosion retting</i>)	Kualitas serat hanya sesuai untuk tekstil teknik dan aplikasi nontekstil
Fisika (<i>steam explosion retting</i>)	Kualitas kehalusan dan sifat serat hampir sebanding dengan kapas
Kimia (menggunakan surfaktan/asam sulfat/ NaOH/natrium karbonat)	Proses singkat (beberapa menit hingga 48 jam), kualitas serat tinggi, namun memerlukan biaya tambahan untuk penanganan limbah

Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 menunjukkan klasifikasi dari *degumming* Meskipun serat rami biasanya di-*degumming* secara kimiawi, kini juga ada perkembangan yang menjanjikan dengan menggunakan mikroba *degumming* (*retting*). Selain itu, beberapa peneliti melaporkan bahwa penggunaan getaran ultrasonik mempercepat proses *degumming* (Ramesh, 2018). Salah satu upaya terbaru dalam efektifitas *degumming* diteliti oleh Shen, Wang dan Long, (2015) dengan penggabungan proses *degumming* secara biologi atau proses *degumming* secara kimia dengan teknologi plasma. Penggabungan proses *degumming* secara biologi maupun kimia dengan teknologi plasma berhasil meningkatkan efektivitas proses *degumming*, memperbaiki sifat mekanik serat, mengurangi konsumsi zat kimia serta mengurangi durasi waktu pengerjaan. Penggabungan metode ini memiliki potensi diaplikasikan tidak hanya untuk *degumming* rami namun juga pada proses *pretreatment* kain kapas mentah dan serat selulosa alam lainnya dengan keuntungan lebih ramah lingkungan karena efisien dalam penggunaan bahan kimia, air maupun energi (Novarini dkk, 2015).

Pemintalan Serat Rami (*Spinning*)

Setelah melewati proses dekortikasi dan *degumming*, serat rami kemudian dipintal menjadi benang dan diproses melalui mesin tenun untuk menghasilkan tenunan

rami (Djafar dkk, 2018). Serat rami dapat dipintal dengan menggunakan tangan maupun dengan peralatan industri.

Karakteristik individu serat rami mulai dari proses *degumming* hingga pembuatan serat umumnya mengalami perubahan yang signifikan. Perubahan-perubahan tersebut diantaranya adalah panjang serat rata-rata (*mean length*) yang menurun drastis (rami awal 200 mm, serat rami menjadi 101,8 mm), kehalusan serat yang meningkat 18,8% (makin halus dari 7,5 denier menjadi 6,09 denier), kekuatan individu serat yang menurun hingga 26,9% (48,0 gram menjadi 35,1 gram) dan mulur serat yang meningkat 17,6% (3,52% menjadi 4,14%). Meski demikian, masih terdapat banyak kelemahan serta kekurangan baik jika ditinjau dari aspek teknis maupun kualitas produk serat/*strand* rami. Secara visual, homogenitas serat rami yang digunakan relatif masih rendah sehingga hal ini berpengaruh terhadap kualitas akhir serat rami. Rendemen serat rami siap pintal dalam bentuk *top* hanya sebesar 0,8%, sisanya adalah berupa *reused waste* sebanyak 1,3% dan limbah terbuang sebanyak 0,15%. Rendemen tersebut diperoleh dari 100% batang rami basah, dengan asumsi rendemen dari hasil dekortikasi 3% dan limbah *degumming* 25%. Kualitas *top* rami 100% yang dihasilkan dan *top* rami (Novarini dkk, 2015).

2.1.3. Aplikasi Serat Rami

Tanaman rami merupakan tanaman tahunan yang mudah tumbuh dan berkembang baik di daerah tropis dan memiliki banyak manfaat diantaranya yaitu daunnya dapat dijadikan bahan kompos dan pakan ternak yang bergizi tinggi, batangnya baik untuk bahan bakar, seratnya diambil untuk diolah menjadi bahan baku tekstil dengan kualitas yang baik jika dibandingkan dengan bahan baku serat alam lainnya (Suherman dkk, 2018). Serat rami merupakan serat multiguna mempunyai karakteristik serat yang panjang, berwarna putih alami dan memiliki penampilan yang halus. Karakteristik ini terbuat dari zat selulosa seperti kapas, linen dan tanaman serat yang lainnya. Selulosa merupakan suatu senyawa karbohidrat yang dapat ditemukan secara melimpah di alam ini. Selulosa terdapat di dalam dinding sel tumbuhan. Selulosa tersusun atas unit-unit glukosa yang berasal dari proses fotosintesis tumbuhan (Murdiyanto, 2017). Bentuk fisik selulosa didalam serat rami sangat kaku tetapi sangat berpori yang memberikan daya serap yang lebih banyak dari pada serat selulosa yang

lainnya, dengan daya serap yang tinggi serat rami menunjukkan kekuatan yang lebih besar ketika basah (Maideliza dkk, 2017). Menurut Murdiyanto, (2017) komposit dengan penguat serat alam yang salah satunya adalah serat rami dapat dimanfaatkan sebagai bahan penyusun peralatan kedokteran gigi seperti gigi tiruan cekat, restorasi *onlay*, *splinting* gigi goyah, pasak gigi dan *space maintainer*.

Serat rami dideskripsikan mirip dengan serat kapas dengan beberapa kelebihan yaitu serat lebih panjang, kekuatan serat lebih besar, daya serap air juga lebih besar. Kekurangan serat rami terdapat pada elastisitasnya yang lebih rendah dan kurang fleksibel jika dibandingkan dengan serat kapas. Hal ini membuat kain dari serat rami terasa lebih kasar (Suherman dkk, 2018) karena karakter yang unik ini membuatnya lebih cocok untuk digunakan dalam pembuatan berbagai macam produk tekstil dan tali pengikat (Maideliza dkk, 2017). Namun, terlepas dari kualitasnya yang unik, ramie relatif kurang menonjol dalam kalender penting tanaman dunia. Menurut Peças dkk, (2018) salah satu hal yang membuat ramie kurang populer dibandingkan dengan serat alami yang lain karena membutuhkan perawatan awal yang mahal.

Secara tradinasional serat rami biasanya digunakan untuk membuat pakaian dan biasanya dicampur dengan kapas untuk membuat rajutan *sweaters*. Selain itu serat rami juga digunakan untuk membuat taplak meja, serbet dan sapu tangan. Serat rami baik digunakan untuk pabrik kain pakaian, jok, kanvas, saringan kain, benang jahit, mantel gas, jaring ikan, dan kemasan laut (Banerjee dkk, 2015) selain dijadikan sebagai bahan tekstil, rami juga dapat dijadikan sebagai kertas dengan kualitas tinggi seperti uang kertas dan kertas rokok (Du, Yan dan Kortschot, 2015).

Menurut Novarini dkk, (2015) campuran rami dengan serat sintetik sangat sesuai untuk bahan pakaian di negara beriklim tropis karena rami memiliki kapasitas daya serap air yang tinggi. Rami dapat dicampur dengan poliester pada komposisi seperti 30:70, 33:67, 35:65, dan 40:60. Pencampuran rami dan poliester atau dengan serat buatan lainnya akan memperbaiki sifat rami yang mudah kusut. Rami juga dapat dicampur dengan wol pada komposisi 50:50. Pencampuran rami dengan wol dapat mengurangi sifat mengkeret wol dan sekaligus meningkatkan kecerahannya.

Penggunaan serat tekstil untuk penguat komposit sebenarnya bukan suatu hal yang baru, namun perkembangan pasar yang cukup luas untuk produk komposit dari

serat alam (batang dan daun) telah terjadi pada dekade terakhir ini. Salah satu bidang aplikasi komposit serat alam yang terus tumbuh pesat adalah industri otomotif (Novarini dkk, 2015) dengan begitu aplikasi substitusi industri serat dengan serat alami dapat dipertimbangkan. Banyak serat alami tradisional yang digunakan dalam menenun, mengecat dan tali, menghadirkan berbagai potensi untuk dijadikan penguat elemen dalam komposit dan teknologi inovatif biodiesel (Maideliza dkk, 2017). Irawan dkk (2019) melakukan penelitian tentang kekuatan tarik dari serat rami dan serat pisang serta *hybrid* serat rami dan pisang dengan pengikat *latex* pada perbandingan 90:10, dimana komposit dengan penguat serat rami memiliki kekuatan tarik yang paling besar yaitu $4,58 \text{ N/mm}^2$, menurut Irawan dkk (2019) bahwa komposit dengan penguat serat rami sebagai komposit *agrofibre* dapat digunakan pada peralatan automotif seperti filter udara, *car body*, dan *chasis*. Sedangkan Wisnujati dan Yudhanto (2018) melakukan eksperimen kekuatan mekanik *exhaust cover composit* untuk sepeda motor menggunakan penguat hibrid serat rami dengan metode *vacuum infusion*. Cover knalpot yang dibuat mempunyai sifat yang lebih ringan dan ulet dibanding jenis *cover* knalpot yang biasanya, Gambar 2.2 menunjukkan *cover* knalpot dengan penguat serat rami.



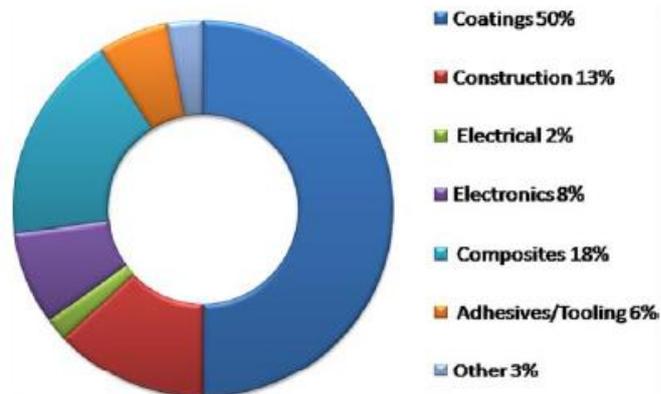
Gambar 2. 2. Hasil produk cover knalpot dengan penguat serat rami (Wisnujati dkk 2018)

2.2. Resin Epoxy

Resin epoksi ditemukan pada tahun 1909 oleh Prileschajew. Resin ini dibentuk menggunakan berbagai macam bahan *curing* melalui reaksi *curing*, dimana sifatnya tergantung pada kombinasi spesifik dari jenis resin epoksi dan bahan *curing* yang digunakan (Jin, Li dan Park, 2015). Resin epoxy dibuat dengan pengabungan reaksi dimana mengandung lebih sedikit dua atom aktif *hydrogen* dengan *epichlorohydrin* sehingga terjadi *dehidrohalogenasi* diantara zat pembentuk (Kumar, 2016). Gambar 2.3 menunjukkan skema proses *dehidrohalogenasi* pada pembentukan resin epoxy.

Zat *curing* mengontrol proses reaksi *curing* resin epoxy dimana reaksi *curing* pada resin epoxy bersifat eksotermik, yaitu pencampuran resin epoxy dan bahan *curing* akan melepaskan panas ke lingkungan tetapi dalam kasus ini, energi yang dilepaskan dalam jumlah yang kecil, oleh karena itu dapat dituangkan pada cetakan tanpa kepanasan (Kumar, 2016). Kekuatan mekanik dan *glass transition* (T_g) resin epoxy tergantung pada struktur molekul zat bahan *curing*. Bahan *curing* dapat dibagi menjadi bahan *curing type Amine, alkali, anhydrides*, dan *catalytic* (Jin, Li dan Park, 2015). Epoxy yang paling banyak digunakan adalah *diglycidyl ether* dari *bisphenol A*, BPA memberikan sifat termal dan mekanik yang baik (Ng dkk, 2017) serta resistensi kimia yang baik (Ramon dan Sguazzo, 2018). *Bisphenol-A* (BPA) adalah salah satu bahan kimia yang paling banyak diproduksi di seluruh dunia dan banyak ditemukan pada aplikasi dalam produk konsumen termasuk wadah makanan, botol, peralatan makan dan kertas untuk kemasan makanan dan peralatan medis (Over dkk., 2019).

Resin epoxy adalah salah satu dari jenis polimer dalam kategori termoset (Bello dkk, 2015) dimana selama lima puluh tahun terakhir, keberadaan material komposit berdasarkan pengikat polimer termosetting untuk aplikasi pesawat telah meningkat secara eksponensial. Saat ini, *Airbus A350* dan *Boeing 787 Dreamliner* adalah pesawat penumpang berawak dengan proporsi struktur komposit mencapai lebih dari 50% dan 53% dengan pengikat polimer termosetting terdapat pada bagian interior dan bagian sekunder. Karakteristik resin epoxy sebagai termosetting dipengaruhi jenis bahan/zat dan proporsi zat *curing* serta siklus *curing* dan aditif yang dapat ditambahkan selama proses formulasi. Untuk *thermosetting epoxies*, rentang kekuatan tarik dari 90 hingga 120 MPa dengan modulus tarik mulai dari 3100 hingga 3800 MPa. Selain itu, resin *thermosetting* ini biasanya memiliki temperatur *glass transition* (T_g) berkisar antara 150 hingga 220 C (Ramon dan Sguazzo, 2018), karena sifatnya yang unggul potensi pasar global resin epoksi (seperti disajikan pada Gambar 2.3) didorong oleh meningkatnya permintaan untuk industri seperti cat dan pelapis, energi angin, aerospace, konstruksi, komposit, dan otomotif (Kumar dan Palaniyandi, 2017).



Gambar 2. 3. Permintaan resin epoksi global berdasarkan sektor (Kumar dan Palaniyandi, 2017)

Resin epoksi dibuat dengan mencampurkan BPA dan epiklorohidrin (ECH), yang kemudian direaksikan untuk menciptakan unit monomer dasar resin epoksi yang disebut BADGE atau DGEBA (BIPRO, 2015) namun juga terdapat komposisi lain epoxy selain BPA, diantaranya resin epoxy *cycloaliphatic*, *Trifunctional*, *Tetrafunctional*, *Novolac*, *Biobased*, *Fluorine-containing*, dan *Silicon-containing* (Jin, Li dan Park, 2015). Dengan munculnya banyak bahan resin epoksi polimer baru, penerapan bahan-bahan resin epoksi di bidang teknik hidrolik dan industri telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir (Xie dkk, 2018). Epoksi dapat digunakan baik dalam bentuk padat (SsER) atau cair (LER) tergantung pada aplikasi. Dengan demikian, jumlah BPA yang tidak bereaksi dalam aplikasi akhir juga akan tergantung pada jenis resin epoksi yang digunakan (BIPRO, 2015).

Resin epoksi telah menjadi bahan pengikat dominan yang digunakan dalam pengembangan bahan komposit masa kini karena sifatnya yang sangat baik (Sun dkk, 2019), menurut Bello dkk, (2015) kelebihan dari resin epoxy yaitu : daya rekat tinggi pada substrat, isolasi listrik tinggi, toksisitas rendah, susut rendah, penyusutan rendah, biaya rendah dan penerimaan tinggi untuk berbagai proses dan aplikasi, sedangkan menurut (Xie dkk., 2018) resin epoxy memiliki kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik, dan masa pembentukan yang singkat sehingga banyak diterapkan pada bidang seperti mesin, konstruksi, industri kimia dan aplikasi teknik sipil.

2.3. Tinjauan Umum Tentang Komposit

Manusia telah lama menemukan bahwa batu bata (tanah liat) dapat dibuat lebih kuat dan lebih tahan lama dengan memperkuat tanah liat dengan jerami. Ada banyak juga komposit yang terjadi secara alami, seperti kayu dan tulang. Kayu terdiri dari serat selulosa yang disatukan oleh pengikat lignin. Tulang terdiri dari serat kolagen pendek dan lunak yang tertanam dalam pengikat mineral. Baik kayu maupun tulang menunjukkan kemampuan beradaptasi yang luar biasa dan kemampuan material komposit dalam mendukung beban dalam kondisi beragam (Sharma dkk, 2020).

Secara umum komposit didefinisikan sebagai kombinasi dari dua atau lebih komponen yang berbeda dalam bentuk atau komposisi pada skala makro, dengan dua atau lebih fase berbeda (Hendra, 2017) dan tidak larut satu sama lain yang terhubung dengan erat. Namun, secara makroskopik, hal tersebut dapat dianggap sebagai bahan yang homogen yang artinya bahwa setiap bagiannya (asalkan ukurannya besar dibandingkan dengan periode mikrostruktur) selalu memiliki sifat fisik yang sama (Bello dkk, 2015).

Material komposit memiliki kekuatan yang tinggi namun juga ringan (Rahman dkk, 2016) sehingga berperan banyak untuk mengganti struktur logam diberbagai bidang industri dan struktur teknik terutama dalam *aerospace*, mobil, perkapalan, peralatan olahraga, dan industri konstruksi bangunan. Dimana 50% penggantian struktur paduan aluminium dengan komposit yang diperkuat dengan serat karbon telah menghasilkan pengurangan berat lebih dari 20% dari seluruh berat struktural (Bello dkk, 2015) sehingga meningkatkan kinerja produk dan biaya produksi menjadi rendah, dilain sisi penggunaan komposit pada bidang *aerospace* terutama pada pesawat komersial dapat mengurangi bobot pesawat hingga 50 % dengan mengganti bagian-bagian utama dengan komposit nanopolimer dengan konstruksi yang lebih ringan sehingga dapat menekan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan kenyamanan penumpang (Panchagnula and Palaniyandi, 2018).

Material komposit banyak dimanfaatkan sebagai aplikasi pengganti logam, bahan bangunan, komponen otomotif, penahan panas, penyerap suara, dan lain-lain (Rahman dkk, 2016). Sejak awal 1960-an (Du, Yan dan Kortschot, 2015), terjadi peningkatan menuntut bahan yang lebih kaku dan kuat, namun lebih ringan dalam

bidang aeronautik, energi, teknik sipil dan berbagai aplikasi struktural. Sayangnya, tidak ada bahan yang memenuhi hal tersebut. Kebutuhan dan permintaan ini tentu saja menyebabkan konsep penggabungan bahan yang berbeda dalam struktur komposit, akibatnya material komposit menjadi bahan rekayasa paling komersial untuk berbagai bidang industri dan non-industri (Sharma dkk, 2020). Pengembangan material komposit serta desain dan teknologi manufaktur terkait adalah salah satu kemajuan terpenting dalam sejarah material (Zweben, 2015).

Komposit biasanya terdiri dari bahan penguat yang tertanam dalam pengikat (*matrix*) ini metode yang efektif untuk meningkatkan kekuatan dan meningkatkan *propertis* secara keseluruhan dengan menggabungkan unsur ke dalam pengikat (Bello dkk, 2015), terdapat dua bahan penyusun komposit yaitu pengikat dan penguat. Bahan pengikat mengikat dan melindungi penguat dengan mempertahankan keadaan relatifnya. Penguat memberikan sifat meknik dan fisik untuk meningkatkan sifat pengikat dengan penggabungan ini material komposit menghasilkan sifat-sifat yang tidak tersedia pada material dengan satu bahan penyusun, sedangkan beragamnya pengikat dan bahan penguat memungkinkan perancang produk atau struktur untuk memilih kombinasi yang optimal (Hendra, 2017). Menurut Sharma dkk (2020) terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi sifat komposit yaitu, geometri penguat, orientasi penguatan, jenis penguat, distribusi konsentrasi kekuatan dan fraksi volume.

Komposit dapat diklasifikasikan sesuai dengan pengikat dan pengisi / *reinforcements*. Sesuai dengan *reinforcements*, komposit diklasifikasikan sebagai diperkuat penguat serat, diperkuat partikel, *structural composites* dan *nanocomposites*. Untuk klasifikasi pengikat, komposit dikelompokkan menjadi tiga yaitu komposit pengikat logam (MMC); komposit pengikat keramik (CMC) dan komposit pengikat polimer (PMC) (Bello dkk, 2015). Sejauh ini PMC adalah jenis komposit yang paling banyak digunakan (Nurhapsari dan Andika 2018) karena harganya murah dan proses pabrikan yang mudah (Sharma dkk, 2020). Namun, ada aplikasi penting dari jenis lain yang menunjukkan potensi besar mereka di aplikasi bidang teknik mesin (Zweben, 2015).

2.3.1. Unsur Pembentuk Komposit

Pengikat (*Matrix*)

Peran pengikat dalam komposit yang diperkuat serat adalah untuk mentransfer tekanan antara serat, memberikan penghalang terhadap lingkungan yang merugikan, dan melindungi permukaan serat dari abrasi mekanik. Peran lain dari pengikat adalah untuk mendukung serat dan mengikatnya bersama dalam material komposit. Pengikat biasanya bersifat lebih ulet, kurang keras, dan berkarakter kontinyu. *Matrix* sebagai pengikat serat dan menyalurkan beban pada serat. Serat ditambahkan ke pengikat dalam bentuk tertentu. Serat biasanya memiliki sifat lebih kuat dari pada pengikat (Hendra, 2017).

Komposit diklasifikasikan menurut jenis bahan pengikat menjadi *metal matrix composites* (MMC), *ceramic matrix composites* (CMC), *polymer matrix composites* (PMCs) (Bello dkk 2015) dan *carbon matrix materials* (Zweben, 2015). Berikut beberapa penjelasan mengenai pengikat tersebut :

Metal Matrics Composite (MMC)

Sesuai dengan namanya, memiliki pengikat logam. Contoh-contoh pengikat dalam komposit tersebut meliputi aluminium, magnesium dan titanium, tembaga, timah, kobalt, perak, dan *superalloy* (Zweben, 2015). Tipe serat yang biasa digunakan termasuk karbon dan silikon karbida (Bello dkk 2015). MMC memiliki ketahanan aus dan konduktifitas yang luar biasa dibandingkan dengan material *metal* konvensional (Sharma dkk, 2020).

Ceramic Matrix Composite

Bahan pengikat berbasis keramik memiliki ketahanan korosi yang tinggi, titik leleh yang tinggi, mempunyai kekuatan tekan yang unggul dan stabilitas pada suhu yang tinggi. Pengikat keramik adalah pilihan umum untuk aplikasi suhu tinggi seperti piston, bilah rotor di bagian turbin gas. Pengikat keramik bisa bertahan baik pada suhu tinggi dan beroperasi secara efisien di lingkungan yang korosif (Sharma dkk, 2020).

Carbon Matrics Composite (CMC)

Karbon, sebagai bahan pengikat, biasanya digunakan dengan serat karbon dalam sistem komposit. Keuntungan utama dari pengikat karbon dan komposit karbon/karbon (C/C) adalah tahan terhadap suhu tinggi lebih dari 2200 °C, dan pada suhu yang tinggi kemampuan carbon dapat meningkat (Zweben, 2015).

Polymer Matrics Composite (PMC)

Ada dua kelas utama polimer yang digunakan sebagai bahan pengikat, *termoset* dan *termoplastik* dengan jenis penguat biasanya serat karbon, serat gelas dan serat alami (Sharma dkk, 2020). Pada saat ini, *termoset* sejauh ini merupakan resin pengikat yang paling banyak digunakan untuk struktur aplikasi. Dalam aplikasi PMC, polimer termosetet atau termoplastik dapat digunakan sebagai komponen pengikat. Pada umumnya, PMC merupakan kombinasi yang sangat baik antara serat dan pengikat. Dalam sistem ini, serat memberikan kekuatan yang tinggi sedangkan pengikat polimer menyebarkan beban dan membantu ketahanan terhadap pelapukan dan korosi (Zweben, 2015). Salah satu contoh dari pengikat termoset adalah Epoxy, Resin epoksi adalah salah satu opsi pengikat dalam pembuatan komposit. Penggunaan Resin Epoksi juga banyak diterapkan pada pengecoran, pelapisan, digunakan untuk isolator listrik, campuran cat dan campuran perekat. Resin epoksi juga memiliki ketahanan aus dan ketahanan goncangan yang sangat baik (Djafar dkk, 2018).

Komposit PMC memberikan berbagai macam kelebihan diantaranya, nilai kekuatan yang tinggi, nilai kekuatan impak yang baik, proses produksi dan peralatan yang murah, ketahanan kimia dan korosi yang luar biasa, serat karaakteristik mekanik yang baik. Aplikasi PMC umumnya terdapat pada roket, pesawat terbang dan peralatan olahraga (Sharma dkk, 2020).

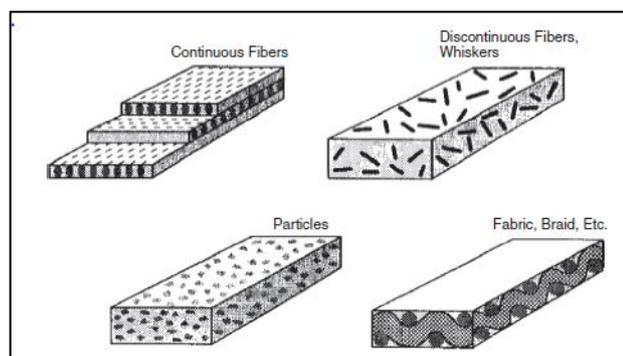
Tabel 2.4 menyajikan sifat representatif dari bahan pengikat yang dipilih dari masing-masing kategori diatas. Seperti yang diperlihatkan pada tabel, sifat-sifat keempat tipe itu berbeda secara substansial. Perbedaan-perbedaan ini memiliki efek mendalam pada sifat-sifat komposit yang menggunakannya (Zweben, 2015).

Tabel 2. 4. Karakteristik jenis pengikat

Material	Kategori	Densitas g/cm^3	Modulus GPa	Tensile Strength(MPa)	Konduk. Termal $W/m.K$
Epoxy	Polymer	1.8	3.5	70	0.1
Aluminium (6061)	Metal	2.7	69	300	180
Titanium (6Al-4V)	Metal	4.4	105	1100	16
Silicon Carbide	Ceramic	2.9	520	-	81
Alumina	Ceramic	3.9	380	-	20
Glass (gurdiosilicate)	Ceramic	2.2	63	-	2
Carbon	Carbon	1.8	20	-	5-90

Penguat (*Reinforcement*)

Unsur penguat (*Reinforcement/filler*) memberikan kekuatan dan kekakuan (Djafar dkk 2018). Dalam kebanyakan kasus, unsur penguat lebih keras, lebih kuat tetapi sangat sulit untuk dibuat. Penguat biasanya dapat berbentuk serat atau partikel. Penguat digunakan dalam bentuk serat kontinu maupun serat pendek (Bello dkk, 2015) serta serat partikel dan *whiskers* (Gambar 2.4).



Gambar 2. 4. Bentuk-bentuk Penguat (Zweben, 2015)

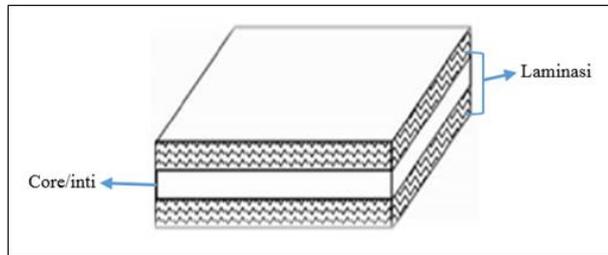
Serat kontinu dan *aligned fibre* merupakan bentuk penguat yang paling efisien dan banyak digunakan terutama pada aplikasi performa tinggi (Zweben, 2015). Serat kontinu memiliki panjang yang sama dengan pada setiap helainya sedangkan serat partikulat mengisi komposit dengan penguat berbentuk partikulat (Bello dkk, 2015).

Secara alami serat yang panjang (kontinyu) mempunyai kekuatan yang lebih dibanding serat yang berbentuk curah/partikel (*bulk*) (Wisnujati dan Yudhanto, 2018).

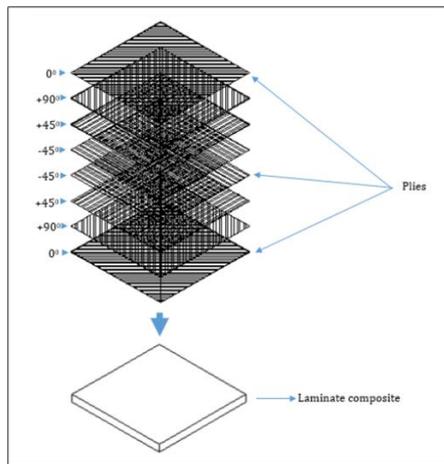
Komposit menjadi sebuah material yang penting dengan kemajuan teknologi dibidang material dibandingkan dengan material konvensional, kemajuan material dibidang komposit disebabkan oleh sebagian besar dari pengembangan serat dengan sifat-sifat yang belum pernah ada pada material konvensional. Serat ini bisa disusun secara acak maupun dengan orientasi tertentu bahkan bisa juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyaman. Serat merupakan material yang mempunyai perbandingan panjang terhadap diameter sangat tinggi (Wisnujati dan Yudhanto, 2018). Serat utama yang sering digunakan dalam aplikasi teknik yaitu serat gelas, serat karbon, serat keramik dan serat alam dimana sebagian serat diproduksi dalam bentuk bundel *multifilaments* dan benang (Zweben, 2015). Selain komposit dibentuk dengan menggunakan serat sebagai penguat terdapat juga komposisi lain untuk membentuk komposit dengan sifat yang tangguh yaitu *structural composites*.

Structural composites merupakan komposit yang kekuatannya tidak hanya bergantung pada komponen komposit tetapi juga pada konfigurasi desain dan geometri lapisan strukturnya yang terdiri dari komposit laminasi dan *sandwich*. Komposit laminasi memiliki jumlah lapisan serat yang ditumpuk lalu diikat bersama untuk memiliki struktur tunggal komposit yang memiliki sifat mekanika yang seragam disegala arah tidak sama pada kasus komposit dengan penguat searah (Zweben, 2015) dimana *Structural composites pada* tiap lapisnya memiliki karakteristik tersendiri (Wisnujati dan Yudhanto, 2018). Komposit laminasi material pilihan untuk berbagai bidang aplikasi teknik seperti suku cadang kendaraan bermotor, peralatan olahraga, dan komponen kedirgantaraan karena sifat fisik dan mekanisnya yang khusus seperti arah kekuatan yang dapat dikendalikan (Panchagnula dan Palaniyandi, 2018). Sedangkan komposit *sandwich* merupakan komposit laminasi yang memiliki inti (Gambar 2.5).

Sifat-sifat struktural laminasi komposit seperti kekakuan, stabilitas dimensi dan kekuatan ditentukan oleh urutan susunan lapisan serat yang menunjukkan distribusi orientasi lapisan melalui ketebalan komposit. Namun, pemilihan orientasi lapisan yang tepat sangat penting dalam desain komposit laminasi yang efisien untuk aplikasi teknik yang ditargetkan (Gambar 2.6).



Gambar 2. 5. Struktur komposit sandwich (Zweben, 2015)



Gambar 2. 6. struktur lapisan komposit laminasi (Zweben, 2015)

Dalam komposit laminasi, serat terbagi dalam berbagai macam bentuk berbeda yaitu *tape*, *woven* dan *knitting*. Lapisan serat dalam bentuk *tape* merupakan lapisan sejajar yang diatur satu arah sehingga komposit yang dihasilkan memiliki kekuatan yang tinggi pada arah yang ditentukan sedangkan lapisan serat dalam bentuk *woven* memiliki 2 arah yang di tenun sepanjang arah longitudinal dan melintang. Lapisan ini mempertahankan orientasi serat dan lebih fleksibel pada penumpukan bentuk-bentuk yang kompleks dari pada *tape* sehingga membuat komposit lebih ringan dengan ukuran kekosongan *void* berkurang, pada umumnya *woven* terbagi menjadi dua jenis yaitu *plain* dan *woven* (Zweben, 2015).

2.3.2. Rule Of Mix

Persamaan untuk mengetahui volume komposit menjelaskan bahwa volume komposit adalah perpaduan antara volume serat dan volume matrik yang dapat dilihat pada Persamaan 2

$$v_c = v_f + v_m = \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m} \quad (2)$$

Dengan : v_f = volume serat/penguat (mm^3)

v_m = volume pengikat (mm^3)

m_f = massa serat (gram)

m_m = massa pengikat (gram)

ρ_f = massa jenis serat (g/mm^3)

ρ_m = massa jenis pengikat (g/mm^3)

Massa komposit didapat melalui persamaan 3 :

$$m_c = m_m + m_f \quad (3)$$

Fraksi volume serat diperoleh melalui Persamaan (4) dan persamaan (5)

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \times 100\% \quad (4)$$

$$W_f = \frac{m_f}{m_c} \times 100\% \quad (5)$$

Dengan W_f = fraksi berat serat (%)

2.3.3. Serat alami (Natural fibre)

Serat alami (*natural fiber*) merupakan jenis serat yang berasal dari hewan maupun tumbuhan yang sifatnya alami (Djafar dkk, 2018). Untuk mendapatkan bentuk serat, diperlukan beberapa tahap pemrosesan tergantung pada karakter bahan dasarnya. Serat dari tumbuhan antara lain kapas, pelepah pisang, enceng gondok, dan rami. Sedangkan serat dari hewan misalnya wool, sutra, dan bulu burung (Wisnujati dan Yudhanto, 2018) yang mengandung selulosa dan protein berturut-turut (Patel dkk, 2019). Pada tabel 2.5 memberikan klasifikasi dari serat alam baik itu dari tumbuhan, hewan dan mineral.

Tabel 2. 5. Jenis-jenis serat alam (Peças dkk, 2018)

	Bast	Flax, Hemp, Jute, Kenaf, Ramie
Cellulose/Lignocellulose	Leaf	Abaca, Banana, Pineapple, Sisal
	Seed	Cotton, Kapok
	Fruit	Coir

	Wood	Hardwood, Softwood (e.g., Eucalyptus)
	Stalk	Wheat, Maize, Oat, Rice
	Grass/Reed	Bamboo, Corn
Animal	Wool/Hair	Cashmere, Goat hair, Horse hair, Lamb wool
	Silk	Mulberry
Mineral	-	Asbestos, Ceramic fibres, Metal fibres

Komposit dengan bahan penguat serat sintesis telah digunakan dalam berbagai aspek kehidupan, dimulai dari kebutuhan rumah tangga, industri kendaraan darat, laut maupun udara, alat-alat olah raga, kesehatan dan rompi anti peluru. Namun, penggunaan serat sintetis sebagai penguat komposit memiliki dampak negatif pada lingkungan karena limbahnya tidak dapat terurai secara alami dan dapat mengganggu hingga beberapa generasi. Untuk mengatasi masalah ini, penggunaan yang disebut “*eco-composite*” dengan dampak lingkungan yang lebih rendah menjadi penting (Wang dkk 2019). Perkembangan teknologi komposit saat ini sudah mulai mengalami pergeseran dari bahan komposit berpenguat serat sintetis menjadi bahan komposit berpenguat serat alam (Mawardi dkk 2018) dimana serat alami digunakan untuk mengurangi penggunaan serat sintetis yang tidak dapat terurai secara hayati dari sumber daya yang tidak terbarukan (Rajaraman 2019) selain karena kekhawatiran publik terhadap kelestarian alam, penggunaan serat alami sebagai bahan penguat komposit juga dapat mengurangi keausan pahat pada operasi permesinan (Mokhtar dkk 2017).

Jumlah produksi komposit terbesar saat ini didominasi oleh serat sintetis dan logam, dimana bahan-bahan alami juga dapat digunakan sebagai bahan komposit alternatif yang ramah lingkungan (Irawan dkk 2019). Karena sifatnya yang ramah lingkungan, banyak peneliti yang tertarik untuk meneliti serat alami sebagai bahan opsional untuk komposit polimer yang diperkuat serat alami (NFRC). Serat alami menawarkan sifat ekonomis, kekuatan mekanik yang baik, *non-abrasiv*, dan *bio-degradability* yang tidak ditemui pada serat gelas dan karbon (Lokesh dkk 2019) serta

kepadatanhm yang rendah (Tran dkk 2020) maupun ketersediaan yang melimpah di alam. Namun, produk organik yang mengandung serat selulosa memiliki beberapa karakteristik negatif, seperti ketidak cocokan dengan pengikat polimer hidrofobik, dan kecenderungan untuk menunjukkan sedikit resistensi terhadap kelembaban yang berkepanjangan (Go´mez dkk 2017). Menurut Sathyamoorthy dan Raja (2018) Salah satu masalah dalam penggunaan serat alami adalah adanya adhesi yang buruk pada serat dan pengikat sebagai akibat dari adanya *waxes* yang hadir pada serat alami.

Di banyak kasus saat ini, serat penguat cenderung bersifat sintetis, seperti serat karbon, serat gelas diperkuat *plastic*, dan PP, tetapi dalam beberapa tahun terakhir, serat alami memiliki mulai digunakan sebagai alternatif ramah lingkungan dalam berbagai aplikasi material (Go´mez dkk 2017). Pergeseran trend teknologi ini dilandasi oleh sifat komposit berpenguat serat alam yang lebih ramah lingkungan, karena serat alami mampu terurai secara alami dan sifatnya yang *reneweble*. Walaupun tak sepenuhnya menggeser serat sintetis, pemanfaatan serat alam yang ramah lingkungan merupakan langkah bijak untuk menyelamatkan kelestarian lingkungan. Komposit berpenguat serat alam juga memiliki rasio kekuatan dengan *density* yang tinggi sehingga komponen yang dihasilkan lebih ringan (Mawardi dkk 2018) karena sifatnya yang ringan dan dapat menerima perlakuan mekanis, komposit serat alami digunakan diberbagai bidang teknik seperti komponen mobil, peralatan olahraga, bagian non-struktur dirgantara (Maleki dkk 2018a), interior automotif dan struktur konstruksi (Shen dkk 2019) serta pengemasan dan elektronik (Patel dkk 2019). Di Jerman Timur, mobil dengan nama '*Trabant*' adalah mobil pertama yang menggunakan komposit dengan penguat serat alami dalam produksinya. *Body* mobil dibuat dari komposit kapas dan poliester. Kemajuan ini telah mendorong pertumbuhan yang cepat dari penerapan serat alami diperkuat *plastic* menjadi bidang manufaktur (Harun dkk 2016). Pada tabel 2.6 memperlihatkan sifat mekanik dari berbagai serat alami.

Tabel 2. 6. Sifat mekanik serat alam (Ramesh, 2018)

Serat alami	Rami	Hemp	Banana	Jute
Density (g/cm ³)	1-1.55	1.2	1-1.5	1.3 -1.5
Tensile strength (kN/mm ²)	180 - 1627	270 - 900	500	610 - 780

Stiffness (kN/mm)	-	-	-	15 - 35
Elongation at break (%)	1.6 – 14.5	1 – 3.5	4.5 - 6.5	1.0 – 1.9
Maximum elongation (mm)	15	5 - 7	9	10 - 14
Tensile modulus (GPa)	1.44 – 82.5	23.5 - 90	12	12 - 60
Young's modulus (GPa)	-	4.8	20	15 - 30

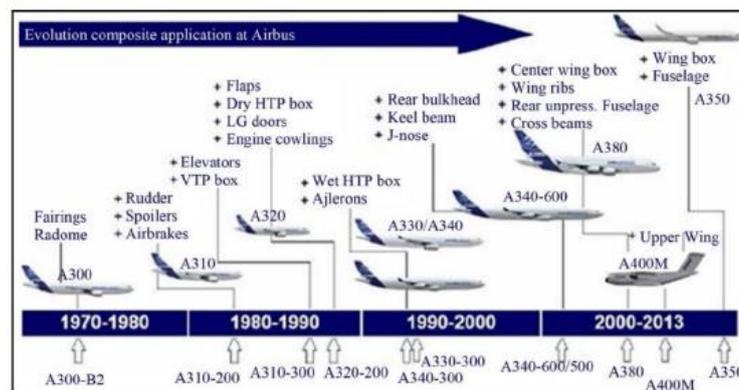
2.4. Tinjauan Umum Tentang Parameter Penggurdian

2.4.1. Pengertian Penggurdian

Material mempunyai sifat yang lebih ringan pada dimensi yang besar dari pada material konvensional, karena sifatnya yang begitu baik maka material komposit banyak digunakan pada aplikasi bidang *aerosapce* (Gambar 2.7) (Xu dkk, 2019), namun faktanya untuk melakukan perakitan, material komposit harus melalui proses permesinan dengan membuat sejumlah lubang gurdi (Ghasemi, Khorasan dan Gibson, 2018) dimana fungsi dari setiap struktur mekanik sebagian besar tergantung pada kualitas perakitan diantara bagian-bagian yang saling berhubungan, yang dicapai melalui penggunaan pengencang mekanis antara lain seperti paku keling, pin, sekrup dan baut (Ismail, 2017). Proses penggurdian adalah salah satu bagian dari apa yang disebut proses pemesinan, yang menjadi suatu proses industri dimana benda kerja dibentuk dengan menghilangkan bahan yang tidak diinginkan. Penggurdian digolongkan sebagai salah satu proses pembentukan chip. Meskipun dalam penggurdian logam, bahan dihilangkan sebagai chip deformasi plastik dengan dimensi yang besar sedangkan pada penggurdian komposit yang diperkuat dengan serat penghilangan material merupakan fraktur dan *chip* seperti bubuk/debu (Lopez, 2015) sehingga penggunaan cairan pendingin membuat proses ekstraksi debu menjadi lebih sulit karena gabungan keduanya akan membentuk bubuk. Selain membuat debu sulit untuk diekstraksi, cairan pendingin dapat menembus ujung serat yang terbuka, berpotensi merusak benda kerja (Hallberg, 2017). Selain itu fenomena yang mendasari pemindahan material untuk material komposit jauh berbeda dari karakteristik permesinan logam, bahan yang berbeda dari fase penguatan dan pengikat membuat

mekanisme pemindahan material menjadi sangat kompleks, karena heterogenitas dan perilaku anisotropik komposit (Caggiano, 2018).

Banyak fenomena negatif yang terjadi dalam proses permesinan material yang dapat menyebabkan kerusakan dan mereduksi kinerja mekanis material komposit, yang kemudian membuat material tidak dapat digunakan dalam aplikasi struktur (Tyczynski dkk, 2015).



Gambar 2. 7. Aplikasi komposit pada pesawat Airbus (Hallberg dkk, 2017)

Untuk menghasilkan lubang selama penggurdian, alat pemotong yang disebut “gurdi/gurdi” berputar pada poros mesin dengan bergerak aksial terhadap benda kerja, terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi hasil gurdi yaitu *feed rate*, *spindel speed*, benda kerja, material gurdi, geometri dan pengaruh kondisi penggurdian seperti pendinginan (Lopez, 2015) dan metode fabrikasi (Sundaram dkk 2017). Struktur material pembangun komposit semakin berkembang dari masa ke masa menyebabkan banyaknya penyelidikan mengenai pengaruh variasi parameter penggurdian komposit, karena kendala karakteristik bahan penyusun yang berbeda menuntut penggunaan parameter permesinan harus disesuaikan dengan sifat material pembangun komposit (Tyczynski dkk, 2015). Pilihan parameter yang tidak tepat dapat menyebabkan degradasi material yang tidak dapat diterima, seperti *fiber pullout* (Zitoune dkk, 2019), *matrix cratering*, kerusakan termal dan delaminasi (Bukhari dan Hussain, 2017) dimana kecacatan ini merusak integritas permukaan lubang yang digurdi untuk proses perakitan, sehingga menurunkan kinerja jangka panjang laminasi komposit (Li dkk, 2018).

Parameter penggurdian dituntut untuk mendapatkan kinerja yang diinginkan, seperti permukaan yang bagus, kualitas lubang gurdi yang baik, akurasi dimensi

komponen, keausan pahat minimum, pelepasan chip mudah, dan sebagainya. Selain itu, mereka harus memenuhi kriteria ekonomi, seperti biaya produksi minimum atau tingkat produksi yang maksimum (Tyczynski dkk, 2015). Selain itu, parameter yang mengatur mekanika penggurdian adalah kecepatan potong, *feed rate*, gaya potong, dan laju pelepasan material (MRR). Ini dibahas lebih lanjut sebagai berikut:

Cutting Speed

Cutting speed adalah tingkat di mana bagian luar atau pinggiran gurdi/*tool* bergerak relatif terhadap benda kerja yang biasanya diukur dalam satuan mm/menit dan merupakan satuan yang terbesar dari semua kecepatan relatif yang dikembangkan dalam operasi penggurdian (Ismail, 2017). Dimana hubungan antara kecepatan pakan dengan rotasi alat potong dirumuskan dalam persamaan 6 :

$$V = \frac{\pi DN}{1000} \quad (6)$$

Di mana V adalah kecepatan periferal yang diukur dalam mm/s, D adalah diameter mata gurdi dalam mm, dan N adalah kecepatan rotasi; sebaliknya disebut sebagai kecepatan spindel, diukur dalam putaran per menit (rpm)

Sehingga kecepatan spindel dapat dirumuskan sebagai persamaa 7 :

$$S = \frac{1000V}{\pi D} \quad (7)$$

Kecepatan pemotongan yang optimal dapat disesuaikan untuk kinerja yang lebih baik, tergantung pada faktor-faktor seperti bahan komposit meliputi kekerasan dan stabilitas termal, kedalaman lubang serta kualitas akhir yang diinginkan, kekakuan alat potong dan orientasi penggurdian (Ismail, 2017).

Feed Rate

Feed rate mengacu pada tingkat di mana alat gurdi maju sepanjang geometri benda kerja, biasanya diukur dalam mm/menit. Dimana ini menandakan tingkat di mana bahan benda kerja dimasukkan ke dalam mata gurdi tanpa menyebabkan kemacetan degan persamaan 8 :

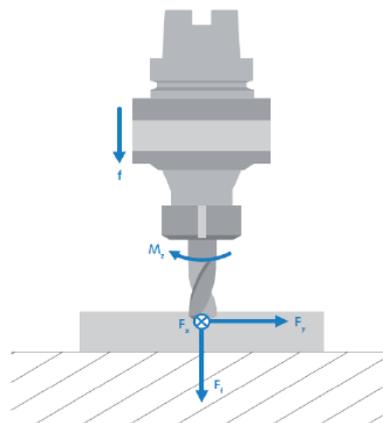
$$F = S \times f \times N \quad (8)$$

Dimana S = kecepatan spindel, f = *feed* per putaran, dan N adalah jumlah *flutes* pada alat pemotong.

Selain itu, *feed rate* adalah parameter standar untuk diameter gurdi yang berbeda, dan sangat bergantung pada sifat kekuatan material benda kerja. Aturan praktis yang baik untuk operasi penggurdian adalah menggunakan tingkat *feed* yang lebih rendah untuk material kerja yang lebih keras, dan tingkat *feed* yang lebih tinggi untuk material kerja yang lebih lunak (Ismail, 2017).

Cutting force

Cutting force mengacu pada gaya kontak yang dihasilkan oleh ujung pahat terhadap permukaan benda kerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2. 8. Cutting force dalam proses penggurdian (Ismail, 2017)

Dari gambar 2.8 M_z : momen penggurdian, F_x : arah gaya potong sumbu x, F_y : arah gaya potong sumbu y dan F_f : *feed force*.

Material removal

Material removal adalah volume material benda kerja yang terlepas per menit, dengan persamaan :

$$MPR = V \times f \times D \quad (9)$$

Dimana f adalah *feed* per rotasi pahat potong (mm/rev)

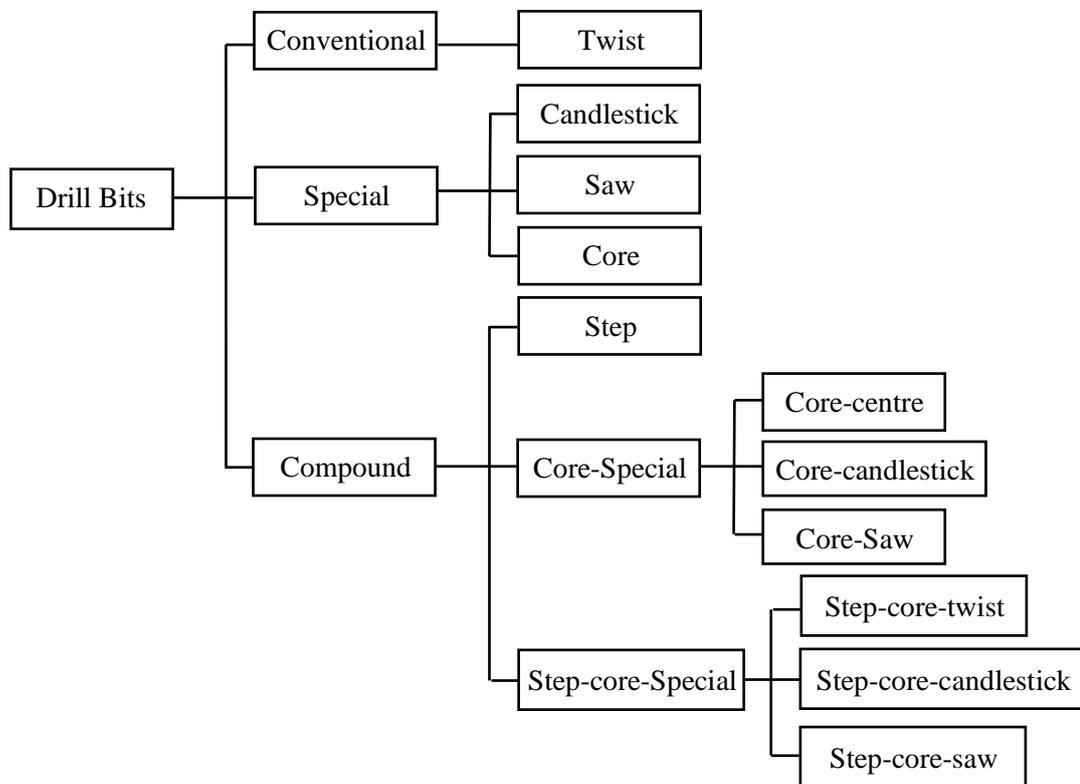
Keausan gurdi adalah salah satu masalah serius terkait baik dengan proses penggurdian tradisional maupun bahan komposit, yang mengarah pada perubahan karakteristik lubang yang diproduksi dan kegagalan alat pemotong (Hallberg, 2017). Banyak teknik eksperimental yang telah dilakukan untuk menghubungkan keausan pahat dengan proses variabel seperti gaya, permukaan akhir, dan delaminasi.

2.4.2. Drill Bits

Investigasi yang dilakukan dalam bidang penggurdian komposit polimer menunjukkan bahwa *feedrate*, *spindel speed* dan geometri pahat adalah tiga parameter yang mempengaruhi kualitas lubang, sebagian besar investigasi dilakukan untuk menentukan *feedrate* dan *spindel speed* yang optimal dalam penggurdian komposit, namun belum ada inovasi yang tepat yang dapat digunakan dalam bidang geometri pahat (Debnath dkk, 2016). Menurut (Sundaram dkk 2017) kualitas lubang dapat dicapai pada tingkat *feedrate* minimum pada GFRPC dan disaat yang sama tingginya tingkat *feedrate* dapat menghasilkan fraktur pada komposit yang secara alami dipengaruhi oleh diameter gurdi dimana permukaan kontak antara alat dan benda kerja dapat meningkatkan beban pada mata gurdi sehingga terjadi penyimpangan suhu sehingga menurunkan kualitas lubang.

Selain itu, geometri alat secara signifikan mempengaruhi kerusakan yang disebabkan penggurdian (Caggiano, 2018) dengan begitu pemilihan geometri gurdi yang tepat juga akan mengurangi efek delaminasi dalam proses permesinan komposit (Hallberg, 2017) sedangkan pendesainan alat baru dengan kinerja yang lebih baik dalam hal biaya, pengurangan kerusakan, dan kualitas lubang adalah faktor utama untuk optimasi proses penggurdian (Caggiano, 2018). Menurut Maleki dkk 2018b tipe mata gurdi yang digunakan berperan krusial dalam menentukan kualitas penggurdian material komposit, Perbedaan jenis gurdi mempengaruhi gaya dorong yang dihasilkan selama penggurdian. Selain tipe gurdi, material gurdi juga berpengaruh pada hasil akhir penggurdian, Menurut (Sundaram dkk 2017) efek delaminasi berkurang pada FRPC karena penggunaan *special drill bits*. Selain itu, penggunaan gurdi *brad and spur* dapat menghasilkan lebih tinggi laju produksi tanpa terjadinya delaminasi, diperoleh dengan laju umpan 2025 mm/menit dan kecepatan spindel 6750 rpm (Othman dkk, 2018). Menurut Debnath dkk (2016) penggunaan gurdi konvensional *twist* menyebabkan kerusakan permukaan yang parah, walaupun masih banyak digunakan dalam penggurdian komposit, menurut Tsao (2012) penggurdian menggunakan gurdi *candle stick and saw* menghasilkan lebih sedikit delaminasi dibandingkan dengan gurdi *twist* dan menurut (Gemi dkk (2019) pembentukan kerusakan sangat dipengaruhi oleh tipe pahat gurdi dimana ketika gurdi *brad and spur drill* dan *brad center* digunakan, *cutting*

force rata-rata pada masing-masing gurdi sebesar 8% dan 13% dibandingkan dengan gurdi konvensional *twist*.

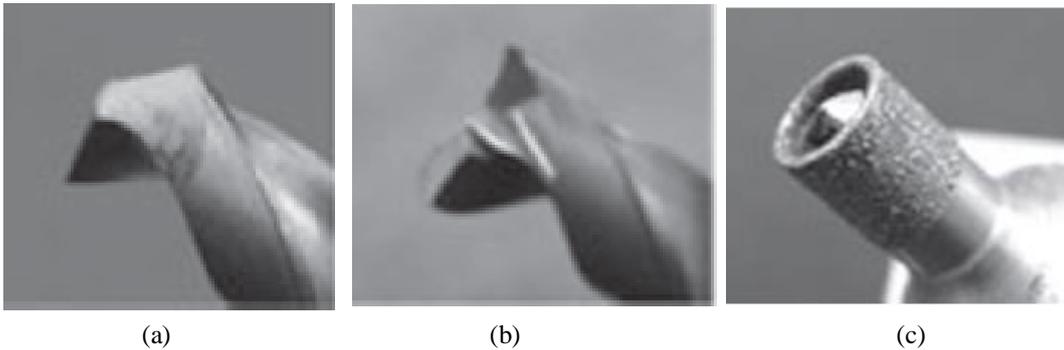


Gambar 2. 9. Klasifikasi drill bits

Pahat gurdi dapat diklasifikasikan sebagai *convensional drill bits*, *special drill*, dan *compound drill*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. *Special drill bits* dapat diklasifikasi ke dalam *candlestick*, *saw drill* dan *core drill*. Sedangkan *Compound drill bits* terdiri dari kombinasi *konvensional drill* dan *Special drill* (Tsao, 2012).

Convensional drill bits, *special drill*, dan *compound drill* memiliki geometri yang berbeda-beda, gambar 2.10 menunjukkan geometri jenis-jenis gurdi (a) *Twist* (b) *candlestick* (c) *core-center drills* (Tsao, 2012).

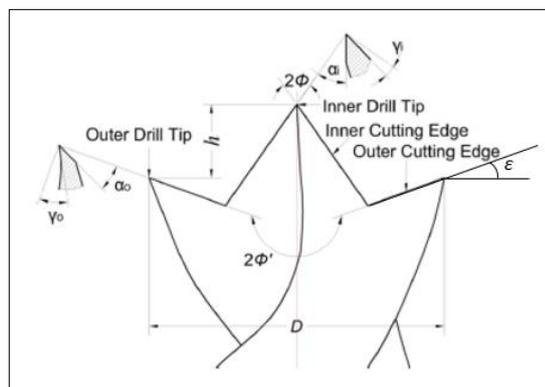
Selama proses penggurdian, karena interkoneksi partikel bahan hancur selama pemotongan, mata gurdi terkena pengaruh mekanis, termal, dan kimia, atau aus. Daya tahan dan masa pakai mata gurdi tergantung pada bahan mata gurdi, bahan benda kerja, mode operasi, dan yang paling penting, kecepatan potong. Umumnya, pelumas digunakan selama penggurdian untuk menghilangkan panas yang dihasilkan selama proses pemotongan (Botak dkk, 2018).



Gambar 2. 10. Geometri pahat gurdi (a) Twist (b) candlestick (c) core–center drills

2.4.3. Candlestick drill (Brad and Spur)

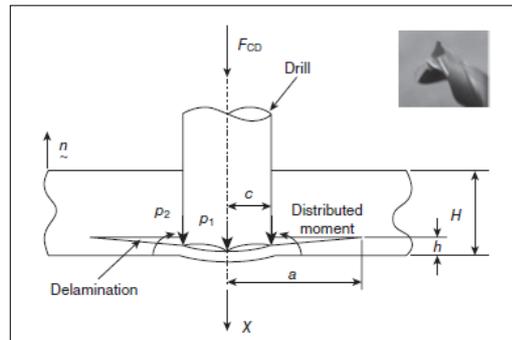
Candlestick atau biasa disebut dengan *brad and spur drill* adalah kombinasi dari *twist drill* dan *saw drill*, yang banyak digunakan untuk menggurdi material komposit. Gurdi *candlestick* terdiri dari tiga *drill tips* dan terdapat 4 *cutting edges*. Dimana terdapat satu *inner drill tips* dan dua *outer drill tips* serta dua *cutting edge* pada masing outer dan inner sedangkan pada masing-masing *cutting edges* terdapat *rake* dan *clearance angle*. Gambar 2.11 menjelaskan geometri dari gurdi *candlestick* dimana sudut antara dua *inner edges* merupakan ujung gurdi dalam atau *inner drill tips* (2Φ), sudut antara *outer cutting edges* pada bidang horizontal adalah outer drill tip angle (ϵ) sedangkan h merupakan jarak antara outer drill tip terhadap inner drill tip pada bidang axial (Liu dkk, 2017b) serta α merupakan *rake angle* dan γ adalah *clearance angle* (Liu, Qi, dkk 2017a).



Gambar 2. 11. Geometri gurdi candlestick (Liu, Qi, dkk, 2017a)

Gaya dorong yang diberikan dari candlestick drill merupakan gerak penyayat yang terkonsentrasi pada center drill kemudian didistribusikan ke sirkular/outer drill (momen tepi).

Gambar 2.12 memperlihatkan skema *candlestick drill* dan indikasi delaminasi. Dimana gerak *tool* terkonsentrasi pada p_1 dan didistribusikan ke bagian tepi p_2 (Tsao, 2012).



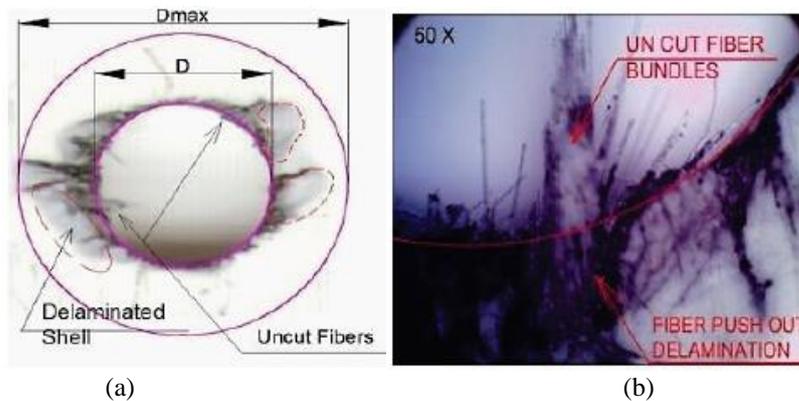
Gambar 2. 12. Mekanisme penggurdian candlestick drill (Tsao, 2012)

2.5. Tinjauan Tentang Delaminasi

Secara umum semua material komposit akan menjalani beberapa proses pemesinan dalam prosedur fabrikasi atau aplikasi teknik yang diperuntukkan bagi komposit. Dalam proses pemesinan, penggurdian adalah salah satu operasi yang paling sering digunakan untuk perakitan struktur komponen dan industri rakitan (Panchagnula dan Palaniyandi, 2018). Dalam industri pesawat terbang, bagian perakitan akhir 60% komponen harus ditolak karena efek delaminasi pada lubang gurdi (Sundaram dkk 2017) sedangkan terdapat sekitar 55.000 lubang gurdi yang digunakan untuk merakit berbagai bagian pesawat Airbus A350 (Ismail, 2017) sehingga konsentrasi *stress* dan kualitas lubang yang tidak tepat akan menyita lebih tinggi faktor biaya (Bukhari dan Hussain, 2017). Pemesinan pada material komposit merupakan pemesinan rumit karena heterogenitas, anisotropi, dan abrasivitas serat yang tinggi, dan menunjukkan beberapa masalah dalam proses penggurdian seperti delaminasi (Sunny dkk, 2014), penarikan serat, penyusutan lubang, *spalling*, *fuzzing*, dan degradasi termal (Can dan Ünüvar, 2017) dan pada akhirnya dapat menyebabkan variasi dalam kekuatan komponen dengan lubang yang digurdi.

Pada gambar 2.13 (a) menunjukkan gambar hasil penggurdian dengan diberikan efek tinta pada sekitar daerah lubang yang menunjukkan terjadinya delaminasi, namun secara kasat mata belum terlihat daerah pecah (*spalled*) sedangkan pada gambar (b) terlihat warna abu-abu diluar lingkaran putus-putus merupakan permukaan laminasi

kaya resin yang terkena efek tinta, dimana dilain sisi budels serat yang terkikis secara acak pada pengikat (matriks) tidak terpotong merupakan delaminasi *push down* akibat penetrasi kebawah gurdi(Can and Ünüvar, 2017).

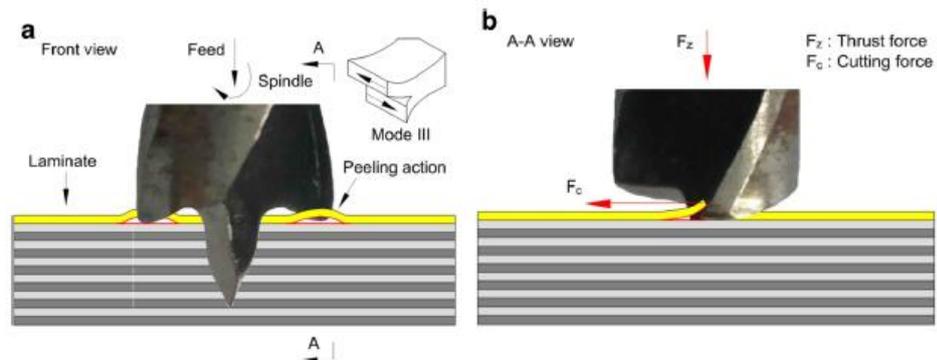


Gambar 2. 13. Evaluasi permukaan hasil penggurdian (a) delaminasi pada lubang gurdi (b) delaminasi dengan pembesaran 50 kali (can dkk 2017)

Delaminasi merupakan salah satu dari model kerusakan kritis yang terjadi pada komposit laminat karena sifatnya yang heterogenitas maka pada saat proses penggurdian dilakukan kedua fasa penyusun tersebut memiliki perilaku yang berbeda dibandingkan dengan sifat masing-masing material saat terpisah satu sama lain. Selain itu penyebab lain dari delaminasi, selain karakteristik material adalah geometri pahat dan variabel proses pemesinan yang digunakan. Oleh karena itu, delaminasi menjadi faktor yang sangat penting untuk diminimalkan untuk menghasilkan lubang gurdi dengan kualitas yang baik (Ilham and Mufarrih, 2018b).

Perhatian utama dalam permesinan komposit (terutama penggurdian) adalah delaminasi dimana kerusakan delaminasi pada umumnya terjadi karena gaya dorong (*trush force*) dalam proses penggurdian alat pemotong terhadap bahan komposit (Chandrabakty dkk, 2019). Saat gurdi masuk ke dalam material, pusat gurdi hampir tidak melakukan pemotongan (kecepatan potong mendekati nol), melainkan menekan material kedepan dan ke samping. Hal ini dapat menyebabkan lapisan terpisah satu sama lain, yang dikenal sebagai delaminasi (Hallberg, 2017). Delaminasi merupakan kerusakan yang paling umum dalam penggurdian baik itu pada struktur permukaan awal pemotongan maupun permukaan diakhir pemotongan dari gurdi (Chandrabakty dkk, 2020) yang bisa dikenal dengan sebutan *peel-up* dan *push-out*, banyak hasil penelitian yang membuktikan bahwa delaminasi *push-out* lebih besar dari pada

delaminasi *peel-up* (Maleki dkk 2018a). (Patel dkk, 2019) menggunakan resin polyster dengan penguat serat *hemp* dan penggurdian dengan menggunakan *twist*, *parabolic drill*, *jo drill*, *step drill*, dan *4 facet drill* dengan delaminasi terbesar cenderung terjadi pada *push-out*.

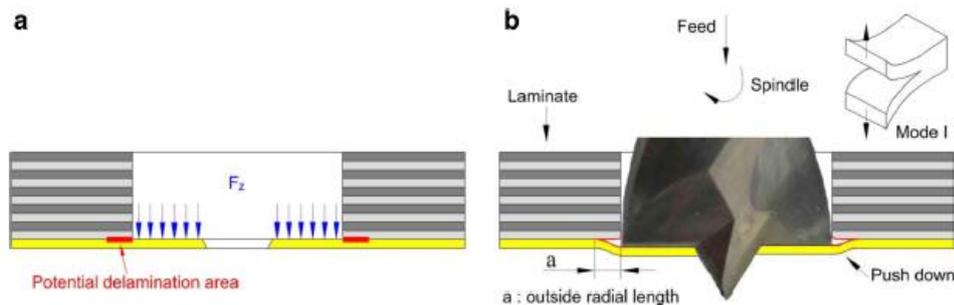


Gambar 2. 14. Mekanisme delaminasi peel-up a tampak depan; b pandangan bidang A-A (Liu, Qi, dkk, 2017a)

Pada gambar 2.14a memperlihatkan mekanisme delaminasi *peel-up* pada lubang permukaan masuk dibawah gerakan sudut pemotong luar *tool*. Tampak depan memperlihatkan pengelupasan serat pada lubang permukaan masuk dari laminasi dibawah penggurdian sudut pemotong luar. Sedangkan gambar A-A menunjukkan gaya potong keatas untuk memisahkan laminasi atas dari bagian yang belum terpotong oleh gaya dorong kebawah jadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14b sudut potong luar akan mengikis laminasi kemudian dengan bergerak maju material yang terkikis (*chip*) akan naik keatas sejauh alur (*flute*). Mekanisme ini memperlihatkan *peeling force* keatas untuk memisahkan laminasi atas dari bagian yang belum terpotong oleh gaya dorong kebawah (F_z). Gaya potong (F_c) bergerak kesekeliling gaya dorong terhadap delaminasi memperlihatkan patah pembebanan tipe III (Liu, Qi, dkk, 2017a).

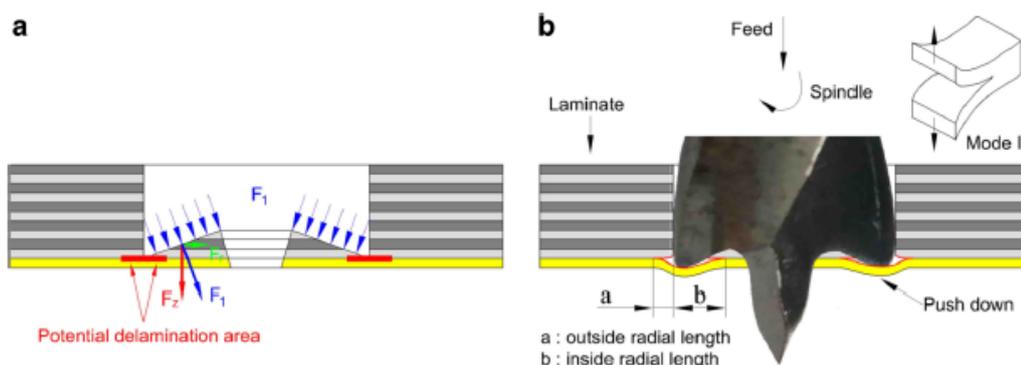
Secara umum ketika gurdi melakukan pemotongan pada laminasi komposit bagian tepi gurdi menghasilkan gaya dorong nominal dalam arah aksial dan kemudian menimbulkan deformasi permukaan karena gesekan-gesekan dari aksi gurdi dan benda kerja (Panchagnula dan Palaniyandi, 2018). Saat penggurdian mendekati laminasi akhir dimana ketebalan laminasi yang belum dipotong menjadi lebih kecil dan ketahanan terhadap deformasi berkurang, pada titik tertentu ketika pembebanan melebihi kekuatan ikatan interlaminar dan delaminasi terjadi dengan patah pembebanan tipe I, ini terjadi sebelum laminasi ditembus gurdi (Liu, Qi, dkk, 2017a). Gambar 2.15 menunjukkan

mekanisme delaminasi *push-down* dimana gaya dorong dihasilkan dari ujung tepi dari gurdi, sehingga potensial area delaminasi terkonsentrasi pada daerah diluar lubang. Menurut (Liu, Qi, dkk, 2017a) Delaminasi *push-down* terjadi karena pembebanan gaya dorong melebihi kekuatan interlaminar sepanjang daerah luar lubang, yang lebih lanjut terbentuk *outside radial length* (a) dibidang delaminasi *push-down*.



Gambar 2. 15. Mekanisme delaminasi push-down tanpa momen tepi (Liu, Qi, dkk, 2017a)

Pada Gambar 2.16 memperlihatkan mekanisme delaminasi *push-down* nampak gaya dorong dihasilkan oleh tepi pemotong luar dan konsentrasi area pembebanan dibawah gaya dorong diantara dua ujung bagian luar sisi gurdi, dimana kedua sisi ujung gurdi merupakan area konsentrasi delaminasi. delaminasi *push-down* terjadi ketika pembebanan melebihi dari kekuatan interlaminar sepanjang kedua sisi luar gurdi dan selanjutnya membentuk *outside radial length* (a) dan *inside radial length* (b) didaerah delaminasi *push-down* (Liu, Qi, dkk, 2017a).

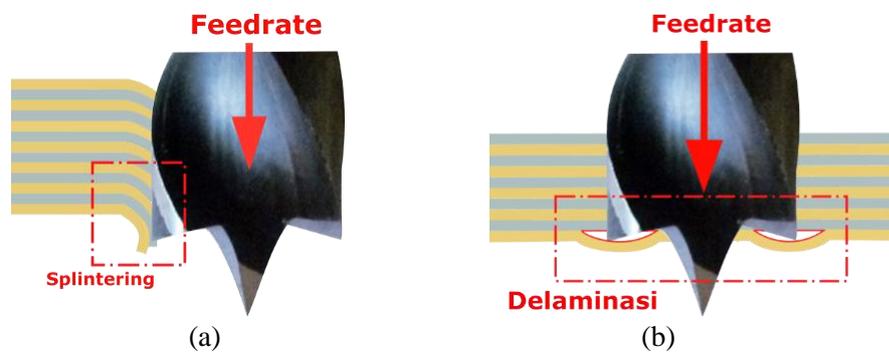


Gambar 2. 16. Mekanisme delaminasi push-up dengan momen tepi (Liu, Qi, dkk, 2017a)

Delaminasi pada sisi masuk dan keluar adalah hal yang penting untuk diminimlir karena dapat menurunkan kekuatan bantalan dan stabilitas material. Kerusakan dan delaminasi akibat proses permesinan umumnya terjadi karena gaya dorong alat pemotong terhadap komposit. Terbentuknya kerusakan delaminasi seperti

splintering dan fiber pull-out terjadi akibat kecenderungan dari pahat gurdi yang terlalu cepat menembus material namun gerakan sudut potong pahat gurdi tidak dapat memotong secara sempurna lapisan penguat. Mekanisme splintering ditunjukkan pada gambar 4.17(a).(Chandrabakty dkk, 2019).

Mekanisme terbentuknya delaminasi merupakan peristiwa yang kompleks dari kombinasi parameter pemesinan yang digunakan. Menurut Velaga dkk (2017) salah satu faktor penting dalam penggurdian komposit yaitu laju umpan (*feedrate*). Peningkatan *feedrate* dapat mengakibatkan laju peningkatan kerusakan delaminasi meningkat. Pada saat proses penggurdian berlangsung dengan menggunakan *feedrate* yang tinggi, material komposit mengalami defleksi. Peristiwa defleksi dipicu oleh laju penghilangan material yang berjalan lebih lambat dari pada laju umpan, sehingga terjadi defleksi yang menekan material komposit ke arah bawah. Pada saat ketebalan material berkurang, terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi disekitar sisi keluar pahat gurdi. Konsentrasi tegangan yang terjadi menyebabkan lapisan akhir komposit terkelupas. Pada gambar 4.17(b). memperlihatkan konsentrasi tegangan pada akhir lamina dan terbentuknya delaminasi.



Gambar 2. 17. Mekanisme terbentuknya delaminasi (a) splintering, (b) Konsentrasi tegangan pada lamina sisi keluar pahat gurdi

Delaminasi merupakan fenomena kegagalan material akibat proses pemesinan yang merupakan masalah yang sangat tidak diinginkan dan telah diakui sebagai masalah utama pada pemesinan komposit laminasi. Delaminasi tidak hanya mengurangi toleransi perakitan secara drastis dan juga kekuatan bantalan tetapi juga memiliki potensi kerusakan untuk kinerja jangka panjang. Ada beberapa metode utama yang digunakan untuk menilai tingkat kerusakan delaminasi di sekitar lubang yang didigurdi. Salah satunya adalah faktor delaminasi (F_d). Faktor delaminasi (F_d) adalah indeks yang

paling umum diterapkan untuk mengevaluasi delaminasi lubang yang digurdi. F_d didefinisikan sebagai rasio antara diameter maksimum dari zona delaminasi (D_{max}) (Melentiev dkk, 2016).

Metode umum yang digunakan untuk mengukur besarnya delaminasi pada hasil penggurdi komposit adalah dengan mencari faktor delaminasi (F_d) yang diperlihatkan pada persamaan 10 (Chandrabakty dkk, 2020) :

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (10)$$

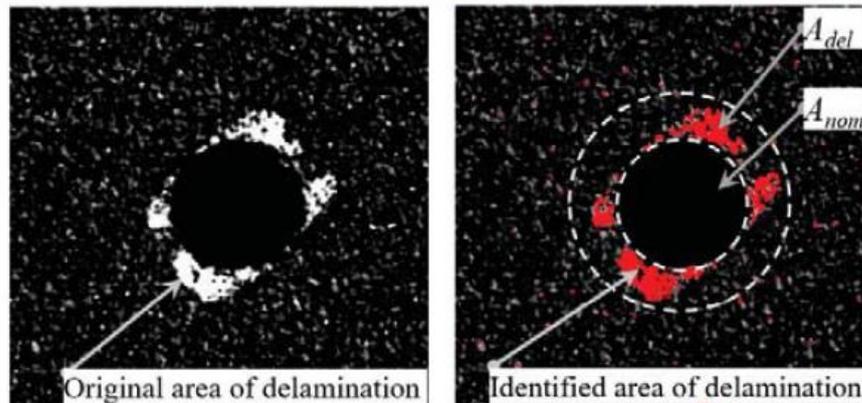
Salah satu batasan kriteria terkait dengan situasi ketika delaminasi yang terlibat tidak melingkar, tetapi menghadirkan *breaks* dan *crack*. Dalam kasus seperti itu, nilai-nilai area yang terdelaminasi lebih sesuai untuk kuantifikasi sebagai kerusakan (Ahmad and Bajpai, 2018). Berdasarkan ini, dapat dipresentasikan pendekatan baru yang dikenal sebagai *Adjusted Delamination Factor*, (F_{da}) yang ditunjukkan pada persamaan 11 :

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_{nom}} + \beta \frac{A_{max}}{A} \quad (11)$$

Dimana A_{max} adalah area yang sesuai dengan diameter maksimum D_{max} ; dan A adalah area nominal lubang. Dalam kriteria ini, suku pertama adalah faktor delaminasi konvensional dan suku kedua ditambahkan untuk memperhitungkan kontribusi area yang rusak, dan parameter α dan β digunakan sebagai bobot. Dengan mendefinisikan β sebagai rasio area kerusakan, dimana A_d merupakan hubungan minus area D_{max} dengan area nominal lubang (A_0) sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (12) dan gambar (2.19). Parameter α adalah komplemen dari β , yaitu $\alpha = 1 - \beta$. Karena itu, Persamaan 2 dapat ditulis ulang sebagai persamaan 13 (Ahmad dan Bajpai, 2018).

$$\beta = \frac{A_d}{A_{max} - A_0} \quad (12)$$

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{A_{max} - A_0} (F_d^2 - F_d) \quad (13)$$



Gambar 2. 18. Luas area nominal dan Dmax (Li, Xu dan Chen, 2018)

2.6. Metode Taguchi

Metode desain eksperimental tradisional (*full factorial*) terlalu rumit dan sulit digunakan. Selain itu, metode ini membutuhkan waktu yang besar jumlah percobaan, ketika jumlah parameter proses meningkat. Pada tahun 1949, Dr.Genichi Taguchi memperkenalkan sebuah Metode Taguchi. Penggunaan Metode Taguchi dapat meminimalkan jumlah tes yang dibutuhkan. Metode ini menggunakan sebuah desain khusus dari susunan ortogonal untuk mempelajari seluruh parameter ruang dengan sedikit percobaan saja (Kilickap, 2010). Taguchi merekomendasikan untuk menganalisis respons rata-rata untuk setiap proses dalam array dan juga menganalisis variasi menggunakan rasio signal-to-noise (S / N) yang dipilih dengan tepat. Teknik ini telah diterapkan untuk memecahkan beberapa masalah yang membingungkan di bidang manufaktur, khususnya untuk mengamati tingkat pengaruh faktor kontrol dan untuk menentukan rangkaian kondisi yang optimal. Array orthogonal digunakan untuk menentukan rencana eksperimenta

Terdapat 3 kategori karakteristik kualitas dalam analisis rasio S/N. Ketiga kategori persamaan tersebut yaitu :

Karakteristik nominal is the best :

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{s_y^2}$$

Karakteristik smaller is the best :

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum y^2 \right)$$

Karakteristik larger is the best :

$$\frac{S}{N} = -\log \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right)$$

Di mana, n adalah jumlah data yang diteliti, \bar{y} merupakan rata-rata data yang diteliti, s^2 yaitu variasi dari y .

2.7. Metode Regresi Linear

Analisis regresi linear merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui bagaimana variabel dependen dapat diprediksikan dengan melalui variabel independen. Penggunaan analisis ini berguna untuk memprediksi hasil variabel dependen dengan melihat naik atau turunnya nilai dari variabel independent. Secara umum analisa regresi merupakan analisa statika yang memodelkan hubungan-hubungan tiap variabel. Dalam analisa regresi terdapat dua jenis variabel yaitu:

- a) Variabel dependen (variabel terikat) merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel lain.
- b) Variabel independent (variabel bebas) merupakan variabel yang mempengaruhi variabel dependen.