

DISERTASI

**OPTIMASI PROSES GURDI PADA MATERIAL KOMPOSIT
SERAT RAMI**

*OPTIMIZATION OF DRILLING PROCESS ON RAMIE FIBRE
REINFORCED COMPOSITE*

SRI CHANDRABAKTY



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
G O W A
2020**



Optimization Software:
www.balesio.com

DISERTASI

**OPTIMASI PROSES GURDI PADA MATERIAL KOMPOSIT
SERAT RAMI**

*OPTIMIZATION OF DRILLING PROCESS ON RAMIE FIBRE
REINFORCED COMPOSITE*

SRI CHANDRABAKTY



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
G O W A
2020**



OPTIMASI PROSES GURDI PADA MATERIAL KOMPOSIT SERAT RAMI

Disertasi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor

**Program Studi
S3 Teknik Mesin**

Disusun dan diajukan oleh

**SRI CHANDRABAKTY
P1400316005**

kepada

**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
G O W A
2020**



DISERTASI
OPTIMASI PROSES GURDI PADA MATERIAL KOMPOSIT
SERAT RAMI

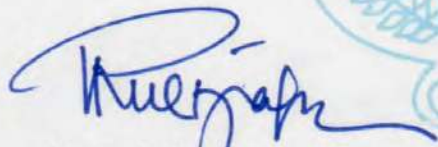
Disusun dan diajukan oleh


SRI CHANDRABAKTY
Nomor Pokok P1400316005

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi
pada tanggal 26 Agustus 2020
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui,
Komisi Penasehat,


Dr. H. Ir. Ilyas Renreng, MT.
Promotor


Dr. Ir. Zulkifli Djafar, MT.
Ko Promotor


Dr. H. Hairul Arsyad, ST. MT.
Ko Promotor

Ketua Program Studi
S3 Teknik Mesin,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin


Erwin Eka Putra, ST. MT. 
Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT



PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sri Chandrabakty

Nomor mahasiswa : P1400316005

Program studi : S3 Teknik Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 06 Agustus 2020

Yang menyatakan,



Sri Chandrabakty



PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, Tuhan yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Disertasi dengan judul "**Optimasi Proses Gurdi Pada Material Komposit Serat Rami**".

Penyusunan disertasi ini dapat terselesaikan berkat dorongan dan motivasi, bantuan, bimbingan dan arahan, serta adanya kerjasama dari berbagai pihak. Untuk itu perkenankanlah penulis menghaturkan banyak terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Rektor Universitas Hasanuddin, atas kesempatan yang diberikan untuk menempuh pendidikan pada Program studi S3 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
2. Rektor Universitas Tadulako, atas izin yang diberikan untuk melanjutkan pendidikan pada Program studi S3 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
3. Ketua Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, atas izin yang diberikan untuk melakukan penelitian di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Ketua Program Studi S3 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
5. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT., sebagai promotor, Dr. Ir. Zulkifli Djafar,

dan Dr. H. Hairul Arsyad, ST. MT., sebagai Ko-promotor, yang telah mengabdikan waktu dan pikiran dalam memecahkan masalah yang dihadapi dalam penelitian dan penulisan disertasi ini.



6. Segenap tim penguji yang terdiri dari; Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST. MT., Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST. MT., Dr. Muhammad Syahid, ST., MT. dan Azwar Hayat, ST. M.Sc, Ph.D, yang telah banyak membantu memberikan masukan dan arahan dalam penulisan disertasi ini.
7. Segenap Dosen dan Staf Pengajar dilingkungan program Studi S3 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, atas ilmu yang diberikan selama mengikuti pendidikan di Program Studi S3 Teknik Mesin.
8. Segenap Staf Administrasi di Program Studi S3 Teknik Mesin atas bantuan dan dukungannya selama ini.
9. Para sahabat, Dr. Bakri, Dr. Khairil Anwar, Dr. Mustofa, Dr. Daud Patabang, Dr. Yuli Asmi Rahman, atas dorongan semangat yang tak pernah henti hingga terselesaikan disertasi.
10. Para sahabat dan rekan-rekan mahasiswa Program S3 Teknik Mesin angkatan 2016, yang senantiasa memberi dukungan semangat, berbagi dalam suka dan duka.
11. Rekan-rekan mahasiswa S3 dan S2 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, atas kebersamaan dan persahabatan selama ini.
12. Para sahabat, Hidayat, ST., Iqbal Muhseng ST. M.Eng, Fahrul, ST. MT., Eriek Ariestya ST. MT., Chandra Nugraha, ST., Ahmad Azhar, ST, Muhammad Iqbal, ST. MT., Andi Yayuk dan Ruslan serta kru Platindo dan Bogolelo FC atas persahabatan dan kesediaannya mendampingi kegiatan penelitian selama ini.



13. Rekan-rekan Staf pengajar, Staf Teknik dan Staf administrasi di lingkungan Jurusan Teknik Mesin Universitas Tadulako atas dorongan mental dan spiritual yang tak henti-hentinya.
14. Keluarga besar H. Andi Inong, H. Andi Syahrir Abidin, Hj. Andi Romangi, H. Andi Yamin Astha dan Andi Arif Astha atas doa dan dukungannya selama mengikuti pendidikan S3.
15. Ibunda Almarhumah Andi Syamsuduha, adinda Yeni Novianty, Eko Ujianto dan Nike Army beserta segenap keluarga atas doa, dorongan serta dukungannya selama ini.

Semoga Allah yang Maha Pengasih berkenan menganugerahkan limpahan rahmat dan hidayah atas semua kebaikan itu.

Gowa, 26 Agustus 2020

Sri Chandrabakty



ABSTRAK

SRI CHANDRABAKTY, Optimasi Proses Gurdi pada Material Komposit Serat Rami (dibimbing oleh Ilyas Renreng, Zulkifli Djafar dan Hairul Arsyad).

Penelitian ini bertujuan untuk (1) menganalisis perilaku kerusakan yang diakibatkan oleh parameter pemesinan yang diberikan pada material komposit berbasis serat alam rami (*Boehmeria nivea*), (2) memperoleh rekomendasi parameter pemesinan yang optimal untuk material komposit yang diperkuat serat rami. Studi ini dilatar belakangi oleh kebutuhan mendapatkan geometri akhir yang presisi dari produk komposit di mana proses perakitan dan pemesinan akan diperlukan, seperti mesin pemotong tepi dan mesin gurdi. Namun masih ditemukan banyak kesulitan dalam proses pemesinan lebih lanjut seperti pada proses gurdi dan *milling*. Kesalahan dalam menentukan parameter, geometri pahat dan material akan meningkatkan “*rate of rejection*” pada tahap akhir perakitan. Penelitian ini diawali dengan pembuatan spesimen material komposit yang diperkuat rami tenunan dengan menggunakan metode *hand lay-up*. Tenunan ini dipintal dari benang tipe 12S/3 yang mengandung 100% serat rami. Sebagai matrik dalam komposit ini menggunakan resin poliester tak jenuh merek YUKALAC @157 BQTN-EX produk PT. Justus Kimiaraya. Proses gurdi dilakukan dengan variasi parameter pemesinan seperti (1) feed rate dari 0.1, 0.18 dan 0.24 mm/rev, (2) kecepatan spindel yaitu 93, 443 dan 1420 rpm, (3) diameter pahat gurdi yaitu 4, 6, 8 dan 10 mm. Selama proses gurdi berlangsung didapatkan data gaya dorong (*thrust force*). Kemudian dilakukan analisis terhadap perilaku kerusakan dengan mengamati kerusakan delaminasi yang terjadi pada permukaan lubang gurdi. Metode analisis Taguchi dan ANOVA dilakukan untuk mengoptimalkan hasil pengamatan terhadap kerusakan delaminasi. Selanjutnya dilakukan pengujian tarik *open hole* untuk mengetahui kekuatan tarik sisa pada material setelah proses gurdi. Pengujian dilakukan dengan mengacu pada ASTM D 5766/D 5766M – 02. Pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk melengkapi analisis terhadap perilaku kerusakan material komposit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan diameter pahat secara signifikan, diikuti oleh peningkatan gaya dorong (*thrust force*). Secara umum, terjadi peningkatan faktor delaminasi seiring peningkatan feed rate dan peningkatan kecepatan spindel, hal ini terlihat di sisi masuk dan sisi keluar lubang gurdi. Peningkatan diameter lubang gurdi (notched) terlihat berpengaruh terhadap menurunnya *residual tensile strength* material komposit yang diperkuat rami tenunan. Sehingga bisa disimpulkan bahwa kerusakan delaminasi sangat erat kaitannya dengan sisa tarik sisa material komposit yang telah mengalami proses

dian.

Kata Kunci: Komposit, rami tenunan, *Boehmeria nivea*, delaminasi, *thrust* metode Taguchi dan ANOVA.



ABSTRACT

SRI CHANDRABAKTY, Optimization of drilling process on ramie fiber reinforced composite (supervised by Ilyas Renreng, Zulkifli Djafar and Hairul Arsyad).

This study aims to (1) analyze the damage behavior caused by machining parameters given to ramie (*Boehmeria nivea*) fiber-reinforced composite material, (2) obtain recommendations for optimal machining parameters for ramie fiber-reinforced composite materials. This study is motivated by the need to obtain a precise final geometry from composite products where assembly and machining processes are needed, such as edge cutting machines and drilling machines. However, there are still many difficulties encountered in the further machining process such as in the drilling and milling process. Errors in determining parameters, tool geometry, and the material will increase the "rate of rejection" at the final stage of assembly. The research began with the manufacture of composite material specimens reinforced with ramie weaved using the hand lay-up method. This woven is spun from type 12S/3 yarn which contains 100% ramie fiber. As a matrix in this composite using unsaturated polyester resins of the YUKALAC @ 157 BQTN-EX product of PT. Justus Kimiaraya. The drilling process was carried out with variations in machining parameters such as (1) feed rates of 0.1, 0.18 and 0.24 mm / rev, (2) spindle speeds of 93, 443 and 1420 rpm, (3) drill tool diameters of 4, 6, 8 and 10 mm. During the drilling process, thrust force data is obtained. Then an analysis of the damage caused by the drilling process by observing delamination damage that occurs in the borehole surface. Taguchi and ANOVA analysis methods are performed to optimize the results of observations on delamination damage. Furthermore, an open hole tensile test is carried out to determine the residual tensile strength of the material after the drilling process. Tests carried out refer to ASTM D 5766 / D 5766M - 02. Scanning Electron Microscope (SEM) observations were made to complete the analysis of the composite material damage behavior. The results showed that the drill bit diameter increased significantly, followed by an increase in the thrust force. In general, there is an increase in the delamination factor as the feed rate increases, and the spindle speed increases, this is seen at the entry and exit side of the borehole. An increase in the diameter of the notched hole is seen to influence the decrease in residual tensile strength of composite material reinforced with ramie woven. So it can be concluded that the delamination damage is very closely related to the tensile strength of the remaining composite material that has encountered a drilling process.

Keywords: Composite, ramie woven, *Boehmeria nivea*, delamination, Thrust force, Taguchi method dan ANOVA



DAFTAR ISI

PRAKATA	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Perumusan Masalah	7
C. Tujuan Penelitian	8
D. Manfaat/Kegunaan Luaran Penelitian	8
E. Kebaruan/Novelty Penelitian	9
F. Ruang Lingkup Penelitian	9
G. Sistematika Penulisan	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Serat alam Rami (Boehmeria Nivea)	13
B. Komposit Serat Alam	15
C. Proses Manufaktur Komposit yang diperkuat Serat Alam ..	18
D. Proses Gurdi dan Kegagalan Pemesinan pada Komposit..	20
E. Model Review dalam Prediksi Delaminasi.....	28



F.	Kekuatan Tarik Open-hole pada Proses Pemesinan Material Komposit	33
G.	Metode Taguchi dalam optimasi parameter pemesinan	35
H.	Penggunaan Analysis of Variances (ANOVA).....	37
BAB III METODE PENELITIAN		
A.	Rancangan Penelitian	40
B.	Bahan dan Alat Eksperimen	42
	1. Bahan yang Digunakan.....	42
	2. Peralatan Eksperimen	44
C.	Prosedur Penelitian	51
	1. Pembuatan Material Uji	51
	2. Proses Penggurdian	53
	3. Pengambilan dan Pengolahan Data	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
A.	Gaya Dorong (<i>Thrust Force</i>) Saat Penggurdian	58
B.	Faktor Delaminasi	67
C.	Analisis Metode Taguchi	80
D.	Analisis dengan menggunakan metode ANOVA	90
E.	Sifat Kekuatan Tarik <i>Open-hole</i> pada komposit yang diperkuat tenunan rami	98
F.	Morfologi permukaan lubang gurdi dengan pengamatan Scanning Electron Microscope (SEM).....	102
PENUTUP		
A.	Kesimpulan	106



DAFTAR PUSTAKA110

LAMPIRAN118



DAFTAR TABEL

1.	Sifat fisik dan kimia serat rami	15
2.	Perbandingan sifat mekanis dari beberapa serat alam dan sintetik	15
3.	Desain eksperimen	53
4.	Korelasi antara diameter pahat, kecepatan spindel dan <i>feed rate</i> terhadap <i>thrust force</i>	64
5.	Setting parameter dan level eksperimen	80
6.	<i>Orthogonal array</i> L ₉ berdasarkan metode Taguchi	80
7.	Respon S/N untuk faktor delaminasi pada pahat gurdi diameter 10 mm	81
8.	Respon S/N untuk faktor delaminasi pada pahat gurdi diameter 8 mm	84
9.	Respon S/N untuk faktor delaminasi pada pahat gurdi diameter 6 mm	86
10.	Respon S/N untuk faktor delaminasi pada pahat gurdi diameter 4 mm	88
11.	<i>Analysis of variance</i> untuk rata-rata pada diameter 10 mm	91
12.	<i>Analysis of variance</i> untuk rata-rata pada diameter 8 mm	93
13.	<i>Analysis of variance</i> untuk rata-rata pada diameter 6 mm	95
14.	<i>Analysis of variance</i> untuk rata-rata pada diameter 4 mm	97



DAFTAR GAMBAR

1.	Tampilan mikroskopik serat rami	14
2.	Struktur dasar tenunan	17
3.	Ilustrasi bagian pada proses penggurdian	21
4.	Skema geometri pahat gurdi khusus yang digunakan untuk penggurdian komposit yang diperkuat serat	24
5.	Pahat gurdi dan bagian-bagiannya	25
6.	Mekanisme delaminasi	26
7.	Ilustrasi definisi dan pengukuran delaminasi	27
8.	Skema penggurdian material komposit	29
9.	Model <i>circular plate</i> untuk analisis delaminasi pada penggurdian dengan pahat <i>twist drill</i>	30
10.	Model <i>circular plate</i> untuk analisis delaminasi pada penggurdian dengan pahat “brad&spurs”	31
11.	Rancangan penelitian	41
12.	Model tenunan rami <i>plain weave</i> 12S/3	42
13.	Resin poliester Yukalac 157 BQTN-EX dan katalis MEKPO	43
14.	<i>Mold release wax</i> merek “ <i>mirror glaze</i> ”	44
15.	Beberapa peralatan yang digunakan saat pencetakan panel komposit	45
16.	Pahat gurdi tipe “ <i>brad&spurs</i> ”	46
17.	Mesin gurdi pillar drill TCA-35 ERLO	47
18.	Alat sensor gaya (Dinamometer)	48
	Tampilan software “makerPlot”	49
	Tampilan software Image-pro plus v 4.5	50



21.	Tampilan software minitab v.17	51
22.	Tenunan Rami	52
23.	Spesimen uji berdasarkan ASTM D5766/D 5766M – 02	53
24.	Set-up eksperimental	54
25.	Contoh pendeteksian dan pengukuran kerusakan delaminasi menggunakan Image-pro plus v4.5	55
26.	Proses pengujian tarik spesimen	56
27.	Tahapan dalam proses gurdi	57
28.	Proses penetrasi pahat gurdi dalam setiap <i>stage</i>	60
29.	<i>Thrust force</i> selama siklus penggurdian pada pahat gurdi berdiameter 4 mm	61
30.	<i>Thrust force</i> selama siklus penggurdian pada pahat gurdi berdiameter 6 mm	62
31.	<i>Thrust force</i> selama siklus penggurdian pada pahat gurdi berdiameter 8 mm	63
32.	<i>Thrust force</i> selama siklus penggurdian pada pahat gurdi berdiameter 10 mm	63
33.	Hubungan antara <i>thrust force</i> dan diameter pahat terhadap kecepatan spindel	66
34.	Korelasi antara <i>thrust force</i> dan <i>feed rate</i> dengan diameter pahat	67
35.	Citra fotografi pengaruh kecepatan spindel dan <i>feed rate</i> terhadap kerusakan delaminasi pada penggurdian diameter pahat 4 mm	69
36.	Citra fotografi pengaruh kecepatan spindel dan <i>feed rate</i> terhadap kerusakan delaminasi pada penggurdian diameter pahat 6 mm	71
37.	Citra fotografi pengaruh kecepatan spindel dan <i>feed rate</i> terhadap kerusakan delaminasi pada penggurdian diameter pahat 8 mm	72
	Citra fotografi pengaruh kecepatan spindel dan <i>feed rate</i> terhadap kerusakan delaminasi pada penggurdian diameter pahat 10 mm	74



39.	Pengaruh kecepatan spindel dan <i>feed rate</i> terhadap faktor delaminasi pada sisi masuk dan keluar	78
40.	Korelasi antara faktor delaminasi dan diameter pahat pada kecepatan spindel 93 rpm	78
41.	Korelasi antara faktor delaminasi dan diameter pahat pada kecepatan spindel 443 rpm	78
42.	Korelasi antara faktor delaminasi dan diameter pahat pada kecepatan spindel 1420 rpm	79
43.	Rasio S/N terhadap kerusakan delaminasi pada diameter pahat gurdi 10 mm	82
44.	Grafik Interaksi 3D (f × N) pada diameter pahat gurdi 10 mm	83
45.	Rasio S/N terhadap kerusakan delaminasi pada diameter pahat gurdi 8 mm	84
46.	Grafik Interaksi 3D (f × N) pada diameter pahat gurdi 8 mm	85
47.	Rasio S/N terhadap kerusakan delaminasi pada diameter pahat gurdi 6 mm	87
48.	Grafik Interaksi 3D (f × N) pada diameter pahat gurdi 6 mm	87
49.	Rasio S/N terhadap kerusakan delaminasi pada diameter pahat gurdi 4 mm	89
50.	Grafik Interaksi 3D (f × N) pada diameter pahat gurdi 4 mm	90
51.	Grafik probabilitas normal (respon terhadap faktor delaminasi), diameter pahat 10 mm	92
52.	Grafik probabilitas normal (respon terhadap faktor delaminasi), diameter pahat 8 mm	94
53.	Grafik probabilitas normal (respon terhadap faktor delaminasi), diameter pahat 6 mm	96
54.	Grafik probabilitas normal (respon terhadap faktor delaminasi), diameter pahat 4 mm	98



55.	Fotografi mekanisme patahan pada spesimen setelah pengujian tarik	99
56.	Hubungan antara tegangan tarik dan elongasi terhadap diameter pahat	100
57.	Pengaruh feed rate terhadap kekuatan tarik <i>open-hole</i> dengan variasi kecepatan spindel pada diameter pahat gurdi berbeda	101
58.	Morfologi permukaan spesimen pada <i>feed rate</i> 0.10 mm/rev	102
59.	Morfologi permukaan spesimen pada feed rate 0.18 mm/rev	104
60.	Morfologi permukaan spesimen pada feed rate 0.24 mm/rev	105



DAFTAR LAMPIRAN

1.	ASTM D 5766/D 5766M – 02 (<i>Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates</i>).	118
2.	Analisis Taguchi dan ANOVA terhadap faktor delaminasi pada hasil gurdi diameter 4 mm dengan software Minitab v.17	124
3.	Analisis Taguchi dan ANOVA terhadap faktor delaminasi pada hasil gurdi diameter 6 mm dengan software Minitab v.17	130
4.	Analisis Taguchi dan ANOVA terhadap faktor delaminasi pada hasil gurdi diameter 8 mm dengan software Minitab v.17	139
5.	Analisis Taguchi dan ANOVA terhadap faktor delaminasi pada hasil gurdi diameter 10 mm dengan software Minitab v.17	150
6.	Artikel ilmiah yang telah terbit di “ <i>Journal of Physics: Conference Series</i> ” volume 1341 2019. Laman https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1341/5 .	159
7.	Artikel ilmiah yang telah terbit di “ <i>International Journal of Automotive and Mechanical Engineering</i> ” volume 17 issue1 Maret 2020 halaman 7618-7628. Laman http://journal.ump.edu.my/ijame/article/view/2440 .	175
8.	Curriculum Vitae Penulis	186



DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan Keterangan
\bar{y}	Rata-rata data yang diobservasi
2D	Dua dimensi
3D	Tiga dimensi
a	Radius dari delaminasi
A	Luas penampang melintang dari spesimen, mm ²
A dan B	Variasi dari dua faktor ANOVA
A ₀	Area yang dari diameter nominal
A _{del}	Area kerusakan delaminasi
A _{max}	Area diameter maksimum delaminasi
A _{nom}	Area nominal lubang penggurdian
ANOVA	Analysis of variance
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials (organisasi standard internasional)
ATM	Alat tenun mesin
cm	Satuan jarak, centimeter
	Diameter lubang/pahat gurdi, mm
	Diameter nominal



dA	Peningkatan area retak delaminasi
D_c	Diameter gurdi, mm
D_{max}	Diameter maksimum
D_{nom}	Diameter nominal
DPI	Satuan ketajaman gambar, <i>dots per inch</i>
dU	Energi regangan yang sangat kecil
dX	Kedalaman gurdi
E	Young's modulus
et al.	Et alii, dan kawan-kawan
f	<i>Feed rate</i> , mm/rev
F	Gaya dorong (<i>thrust force</i>), N
F_a	Faktor delaminasi dua dimensi
F_A	Gaya dorong (<i>thrust force</i>)
F_C	<i>Thrust force</i>
F_d	Faktor delaminasi
F_{da}	<i>Adjusted delamination factor</i>
FRP	Fiber reinforced plastic
G_{IC}	Energi perambatan retak kritis per unit area
gr	Satuan bobot, gram
GUI	<i>Graphical user interface</i>
H	Kedalaman gurdi, mm
H	Ketebalan benda kerja
	Ketebalan benda kerja yang belum terpotong oleh pahat



H_B	Kekerasan brinell
kg	Satuan bobot, kilogram
kW	Satuan daya, kilowatt
L	Panjang spesimen, m
L_{sp}	Jarak support span, m
M	Kekakuan per satuan lebar material komposit
MEKPO	<i>Methyl ethyl ketone peroxide</i>
mm	Satuan jarak, millimeter
mm/rev	Satuan feed rate, <i>millimeter per revolution</i>
mm ²	Satuan luas, millimeter bujursangkar
MPa	Mega pascal
MPa	Satuan tegangan, megapascal
MRR	<i>Material removal rate</i>
N	Kecepatan spindel, rpm
n	Jumlah data yang diobservasi
N	Satuan gaya, Newton
n_{ABi}	Jumlah titik data pada kondisi A dan B
P	Persentase kontribusi
P_1	Konsentrasi beban terpusat
P_2	Beban sirkular terdistribusi
P_c	Konsumsi daya, kw
P_{max}	Beban maksimum saat patah
	<i>Revolution per minute</i> (putaran per menit)
	Resin transfer moulding



S	Konstanta ratio c/a
S/N	Rasio <i>signal to noise</i>
s^2	Variasi dari y
SMC	Sheet moulding compound
SS_e	<i>Error sum of square</i>
SS_M	Rata-rata jumlah kuadrat (<i>means sum of square</i>)
SS_T	Total jumlah kuadrat (<i>sum of squares</i>)
T	Waktu gurdi, detik
U	Energi regangan yang tersimpan
ν	Poisson's ratio dari material komposit
V_c	Kecepatan potong, mm/min
V_f	Fraksi volume dari serat
W	Lebar spesimen, m
W_f	Fraksi berat dari serat
X	Displacement
y	Data observasi
α	Nilai bobot persamaan delaminasi
α	Rasio beban melingkar dan beban terpusat
β	Nilai bobot persamaan delaminasi
π	(Pi) rasion keliling lingkaran dengan diameter
σ_{OH}	Kekuatan tarik ultimate untuk <i>open-hole</i>



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Material komposit merupakan kombinasi dari dua atau lebih material untuk mendapatkan sifat dan kemampuan yang lebih baik dibanding material penyusunnya. Berbeda dengan paduan logam, masing-masing bahan mempertahankan sifat kimia, fisik, dan mekanis yang terpisah. Pada material komposit terdapat dua konstituen utama yaitu penguat dan matriks. Keuntungan utama dari material komposit adalah kekuatan dan kekakuannya yang tinggi, dengan rapat massa yang rendah. Sehingga bila dibandingkan dengan material curah, memungkinkan untuk diperoleh material dengan berat jenis yang lebih rendah. Aplikasi pemanfaatan komposit sekarang ini dapat dijumpai pada peralatan industri hingga peralatan rumah tangga. Untuk menghasilkan produk tersebut membutuhkan proses pemesinan.

Proses pemesinan pada material komposit yang diperkuat oleh serat sintetis maupun serat alam, masih menjadi hal yang sulit untuk dilakukan disebabkan oleh beberapa faktor seperti; kekakuan spesifik yang tinggi, kerapuhan, ketidakhomogenan (*non-homogeneous*) serta konduktivitas *thermal* yang rendah, (Bosco *et al.*, 2013). Hal tersebut akan berdampak pada hasil pemesinan yang mengalami kerobekan (*tears*), cacat, kualitas

yang rendah dan tingginya keausan permukaan sisi potong pahat untuk mendapatkan hasil pemesinan yang berkualitas baik, maka



dibutuhkan keakurasian dan prediksi yang tepat dalam menentukan parameter-parameter seperti gaya potong, kedalaman pemotongan (*the depth of cut*), kecepatan potong (*cutting speed*) dan laju pemakanan (*feed rate*).

Kesalahan dalam menentukan parameter, geometri pahat dan material akan meningkatkan "*rate of rejection*" pada tahap akhir perakitan. Tingginya "*rate of rejection*" hingga mencapai 60% dan sangat banyak ditemui pada proses penggurdian lubang dan pada umumnya kerusakan tersebut berupa, delaminasi, konsentrasi tegangan dan kualitas lubang yang tidak sesuai di mana akan berdampak pada meningkatnya biaya produksi, (Stone dan Krishnamurty, 1996). Delaminasi merupakan fenomena kerusakan, yang timbul karena sifat *anistrophy* dan kegetasan dari material komposit. Beberapa peneliti menganggap bahwa, *thrust force* (gaya dorong) sebagai salah satu penyebab terjadinya delaminasi dan mereka meyakini bahwa ada "*critical thrust force*" di mana pada kondisi tersebut tidak terjadi kerusakan, (Kavad *et al.*, 2014). Sebelumnya König dan Graß, (1989) telah mengungkapkan bahwa *thrust force* berperan penting sebagai penyebab delaminasi, tetapi hal tersebut tidak akan berdampak parah hingga gaya dorong mencapai titik kritis.

Pada beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk menganalisis dan mempelajari pengaruh pemesinan pada material komposit dikatakan bahwa, delaminasi terbesar terjadi pada *feed rate* yang lebih besar di mana

meningkatkan gaya dorong pada saat *feed rate* meningkat, (Ramesh 2014). DiPaolo *et al.* (1996), menyimpulkan bahwa delaminasi atau



kerusakan lubang gurdi dan *thrust force* tiba-tiba, sangat terkait dengan orientasi serat dan terdapat tiga mekanisme penting kerusakan yang diidentifikasi sebagai penyebab pertumbuhan delaminasi; *plate bulge*, *spall opening* and *spall tearing/twisting*. Sementara Abrão *et al.*, (2008) menyatakan bahwa, peningkatan kecepatan pemakanan (*feed rate*) secara signifikan meningkatkan *thrust force*, sementara peningkatan kecepatan spindel tidak terlalu berpengaruh pada proses penggurdian material komposit yang diperkuat serat. Hocheng dan Puw, (1992) telah menganalisis hubungan antara geometri pahat dan kualitas lubang. DiPaolo *et al.* (1996) berkesimpulan bahwa delaminasi ataupun kerusakan tidak disebabkan oleh tepi pahat melainkan karena pemotongan ujung lubang.

Penelitian dengan material komposit dengan proses manufaktur *hand lay-up* dan *compressing molding* juga telah dilakukan oleh Abilash dan Sivapragash (2013) yang menggunakan komposit dengan penguat serat batang bambu. Susunan orientasi serat 0/90 dicetak dengan menggunakan resin *unsaturated polyester* kemudian ditekan pada suhu 35° C dan diberi tekanan 10 bar selama 3 menit. Pada penelitian ini Abilash dan Sivapragash (2013), mengungkapkan bahwa *feed rate* dan diameter gurdi memberi kontribusi besar terhadap faktor delaminasi, di mana *feed rate* yang rendah mampu meminimalisir faktor delaminasi pada saat penggurdian sehingga mampu menghasilkan kualitas lubang yang lebih baik. Menurut Khashaba (2004), material penyusun spesimen komposit,

dan waktu pemesinan memiliki pengaruh yang signifikan pada gaya dorong (*thrust force*) dan torsi selama proses pemesinan.



Sebaliknya, meningkatnya kecepatan potong di penggurdian pada arah serat *cross-winding*, *woven* dan *chopped* akan mengurangi delaminasi *push-out* yang diakibatkan oleh menurunnya gaya dorong.

Proses gurdi selain menghasilkan kerusakan seperti delaminasi dan retak matrik di sekitar lubang, pada akhirnya akan menjadi penyebab degradasi pada kekuatan tarik sisa (*residual tensile strength*) dari komponen yang mengalami penggurdian. Karimi, *et al.*, (2012) mendapatkan bahwa *feed rate*, selain berpengaruh signifikan pada bertambahnya faktor delaminasi juga terhadap kekuatan tarik material komposit woven glass/resin epoxy. Abdul Nasir, *et al.* (2015), menyimpulkan dari analisis statistik dari hasil eksperimental bahwa nilai kekuatan tarik *open-hole* yang maksimal dapat diperoleh melalui pemilihan parameter yang tepat dari *feed rate* dan kecepatan spindel. Kekuatan tarik *open-hole* dan kerusakan delaminasi dapat pula ditingkatkan dengan menggunakan jenis *steps drill bit* dengan kemiringan sudut potong 85°. Pada penelitian terhadap komposit yang diperkuat serat alam *hybrid* sabut kelapa/serat agave, (Chandrabakty, *et al.*, 2018) menyatakan bahwa setelah penggurdian lubang kekuatan tarik komposit *hybrid* menurun diakibatkan oleh adanya konsentrasi tegangan di sekitar lubang dan kekuatan tarik normal komposit yang diperkuat serat alam *hybrid* (sabut kelapa/serat agave) berkisar antara 75%-98%.

Beberapa pendekatan statistik juga telah dilakukan sebelumnya

mendapatkan parameter proses pemesinan, demi mengoptimalkan produksi, diantaranya menggunakan aplikasi metode Taguchi. Pang



et al., (2013), melaporkan bahwa aplikasi metode Taguchi pada komposit *hybrid* dengan *matrix epoxy* yang diperkuat *halloysite nanotube* dan aluminium mampu menentukan kombinasi terbaik dari parameter pemesinan yang memberikan respon optimal dengan hasil nilai kekasaran permukaan dan gaya potong yang lebih rendah. Mohan *et al.* (2007) menggunakan metode Taguchi untuk menganalisis kerusakan delaminasi dan menggunakan faktor berganda pada proses gudi material komposit GFRP dan disarankan untuk optimasi parameter pemesinan. Metode Taguchi dan ANOVA juga digunakan oleh Balaji, *et al.*, (2016), untuk mengidentifikasi signifikansi dari efek parameter pemotongan pada getaran pahat gudi dan kekasaran permukaan. Hamdan, *et al.*, (2012) mengklaim bahwa metode optimasi Taguchi adalah metode yang paling efektif untuk mengoptimalkan parameter pemesinan, di mana variabel respon dapat diidentifikasi.

Penelitian mengenai perilaku pemesinan pada material komposit lebih banyak ditekankan pada komposit yang diperkuat oleh serat sintetik utamanya serat gelas (GFRP). Sementara itu penelitian terhadap perilaku pemesinan pada komposit yang diperkuat serat alam masih sangat sedikit, dilain pihak perkembangan penggunaan material komposit berpenguat serat alami ini terus meningkat. Material komposit berbasis serat alami telah mendapatkan tempat pada pemanfaatan dalam banyak aplikasi, terutama di bidangomotif, kedirgantaraan, transportasi, konstruksi dan energi

banyak bagian interior dan eksterior mobil memadukan termoplastik dengan komposit berbasis serat alami karena kemajuan dalam



industri polimer serta merupakan komposit termoplastik yang berbiaya rendah dan ringan (Holbery dan Houston, 2006). Ada beberapa alasan yang menyebabkan orang berpaling ke serat alam, antara lain disebabkan karena memiliki keunggulan yaitu ringan, kuat, *biodegradable*, terbarukan serta keberadaannya melimpah. Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan serat alami seperti rami (Goda, *et al.*, 2003), *hemp* (Espinach *et al.*, 2013), jute (Rana *et al.*, 1998), sisal (Li, *et al.*, 2000), bambu (Okubo, *et al.* 2004), kenaf (Akil *et al.*, 2011), serat pisang (Pothan, *et al.*, 1997), kelapa sawit (Shinoj *et al.*, 2011), melinjo (*Gnetum gnemon*) (Chandrabakty *et al.*, 2013), serat sabut kelapa (Bakri *et al.*, 2015) dan serat lainnya telah dikembangkan sebagai penguat komposit pengganti serat sintetis.

Pemanfaatan serat alam sebagai material panel interior otomotif telah lama dilakukan sejak tahun 1940 an dan hingga sekarang terus dikembangkan, (Chandrabakty *et al.*, 2013). Dalam penelitian sebelumnya Chandrabakty *et al.*, (2013), telah melakukan percobaan dengan menggunakan material komposit yang diperkuat serat batang melinjo sebagai bahan *door panel* kendaraan dikarenakan serat ini memiliki struktur serat yang kontinu dan anyaman alami yang kuat serta mampu mereduksi berat antara 10% hingga 30% (merupakan hal yang utama dalam perancangan otomotif). Bakri *et al.*, (2015) melaporkan bahwa komposit yang diperkuat serat sabut kelapa sangat potensial digunakan sebagai bahan alternatif pembuatan baling-baling kincir angin. Serat rami memiliki

an selulosa relatif paling tinggi diantara serat alam lainnya. Serat
n bambu telah dikenal mampu digunakan sebagai bahan struktural



tetapi peluang serat non kayu dan non bambu memiliki kesempatan untuk dikembangkan sebagai bahan struktural namun perlu dimodifikasi agar diperoleh sifat-sifat yang optimal (Olessen dan Plackett, 1999). Serat rami memiliki berat jenis antara 1,5 - 1,6 g/cm³ dengan modulus elastisitas sebesar 61,5 GPa (Mueller dan Krobjilowski, 2003). Sifat mekanis serat rami juga relatif paling tinggi dibandingkan dengan serat alam selulosa kenaf, jute, sisal dan flax. Hal ini memberikan peluang digunakan untuk serat penguatan kontinyu pada bahan komposit matrik polimer.

Sebagaimana pada pemesinan material komposit yang diperkuat serat sintetik, serat alam ternyata mempunyai *properties* dan kekhasan tersendiri, sehingga dirasakan perlu untuk melakukan penelitian terhadap optimasi material komposit dan perilaku pemesinan untuk mendapatkan parameter-parameter, sehingga proses pemesinan dapat dioptimalkan.

B. Perumusan Masalah

Dari analisis di atas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan terkait dengan penelitian yang akan dilakukan :

1. Seberapa jauh pengaruh parameter pemesinan terhadap waktu gurdi dan gaya dorong (*thrust force*) dan implikasinya pada perilaku kerusakan lubang gurdi?
2. Seberapa besar keakurasian dalam menentukan parameter pemesinan akan mengoptimalkan proses pemesinan dan mengurangi cacat dan kerusakan yang timbul?



3. Seberapa besar pengaruh proses parameter pemesinan, terhadap kekuatan tarik *open-hole* pada komposit yang diperkuat serat rami?

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Menganalisis pengaruh parameter pemesinan terhadap waktu gurdi dan gaya dorong (*thrust force*) dan implikasinya terhadap perilaku kerusakan (delaminasi) lubang gurdi komposit yang diperkuat serat rami.
2. Menganalisis perilaku kerusakan (delaminasi) pada komposit serat rami akibat proses pemesinan untuk mendapatkan parameter pemesinan yang tepat.
3. Menganalisis pengaruh proses parameter pemesinan, terhadap kekuatan tarik *open-hole* pada komposit yang diperkuat serat rami.

D. Manfaat/Kegunaan Luaran Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu dan teknologi dalam bidang rekayasa material dan manufaktur. Di Indonesia penelitian ini diharapkan pula dapat memberi nilai tambah komoditas bagi pembudidayaan tanaman rami (*Boehmeria nivea*) yang sumber tersedianya sangat melimpah dan terbarukan. Penelitian ini juga dapat menjadi panduan bagi para pengguna bahan serat rami sebagai media penguatan pada komposit polimer, baik termoset maupun epoksi, untuk aplikasi teknik serta pengkayaan pemilihan bahan khususnya kelompok serat alam selulosa.



Hasil dari penelitian ini diharapkan pula memberi masukan dan rekomendasi bagi para pelaku pemesinan khususnya proses gurdi mengenai parameter-parameter yang tepat dan menghasikan hasil yang baik pada proses pemesinan komposit berbasis serat alam.

E. Kebaruan/Novelty Penelitian

Unsur kebaruan yang diharapkan akan diperoleh dari penelitian ini antara lain:

1. Mengungkap hubungan antara waktu gurdi (*drilling time*), gaya dorong (*thrust force*) dan perilaku kerusakan pada komposit yang diperkuat serat rami.
2. Mendapatkan informasi perilaku kerusakan pada komposit yang diperkuat serat rami akibat proses pemesinan gurdi.
3. Mendapatkan parameter pemesinan yang sesuai dan tepat terhadap pada proses pemesinan gurdi material komposit yang diperkuat serat rami.
4. Memberikan rekomendasi kriteria optimal dan kompatibilitas parameter pemesinan pada komposit serat alam.

F. Ruang Lingkup Penelitian

Cakupan kegiatan penelitian yang akan dilakukan sebagai berikut:

1. Material komposit yang menjadi target kajian adalah berpenguat serat di mana serat rami sangat umum digunakan pada aplikasi komposit berbasis serat alam karena kekuatan serat yang cukup tinggi.



2. Proses pemesinan yang dikaji adalah proses gurdi, yang banyak dilakukan pada proses pemesinan pada material komposit, dengan memberikan variasi pada parameter pemesinan untuk memperoleh hasil yang optimal.
3. Melakukan pendekatan statistik dengan metode Taguchi dan ANOVA untuk mendapatkan parameter proses pemesinan untuk mengoptimalkan hasil produksi.

G. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disertasi hasil penelitian ini meliputi beberapa bagian sebagai berikut:

Ringkasan; berupa uraian singkat dan jelas mengenai latar belakang penelitian, permasalahan yang diperoleh, tujuan yang akan dicapai, metode yang akan digunakan dalam memenuhi tujuan, manfaat yang diperoleh serta luaran yang dihasilkan.

BAB I. Pendahuluan; berupa penjelasan mengenai latar belakang dengan mengacu kepada penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Bab ini juga akan memuat mengenai rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, kebaruan/novelty penelitian, ruang lingkup penelitian, sistematika penelitian.

BAB II. Tinjauan Pustaka; kajian literatur dari berbagai sumber berupa buku dan terbitan lainnya yang seiring dan mendukung dengan objek penelitian akan ditampilkan di dalam bab ini. Kajian tersebut diantaranya akan menjelaskan mengenai serat rami beserta sifat fisik dan mekanisnya,



komposit serat alam, proses pemesinan pada komposit serat alam, proses pengurdian dan kegagalan pemesinan pada serat, kekuatan tarik *open-hole* pada material komposit yang mengalami pengurdian dan penggunaan metode Taguchi dan ANOVA dalam menganalisis hasil proses pemesinan.

BAB III. Metode Penelitian; rancangan kegiatan penelitian yang berisi prosedur penelitian, diagram alir penelitian, waktu dan tempat dilakukannya penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian, populasi dan sampel, teknik pengumpulan data, definisi operasional dan teknik analisis data akan dimuat dalam bab ini.

BAB IV. Hasil dan Pembahasan; memuat hasil penelitian yang diperoleh dari pengolahan data hasil eksperimen dan analisis menggunakan metode statistik Taguchi dan ANOVA. Data yang diolah dihasilkan dari eksperimen proses pemesinan dengan mesin gurdi dengan memberikan variabel parameter pemesinan. Parameter pemesinan yang diberikan adalah variabel laju pemakanan (*feed rate*, mm/rev), kecepatan putaran spindle (*spindle speed*, rpm) dan variabel diameter pahat gurdi. Analisis kerusakan (delaminasi) kemudian dilakukan pada spesimen yang telah digurdi untuk mendapatkan optimasi parameter pemesinan pada material komposit yang diperkuat tenunan rami. Selain analisis delaminasi, spesimen uji juga akan dikaji dalam kekuatan tarik *open-hole* dengan melakukan pengujian *open-*

sile test. Untuk memaksimalkan optimasi parameter pemesinan dengan pendekatan metode statistik yaitu metode Taguchi dan

Hasil kajian yang diperoleh kemudian ditampilkan dalam bentuk



tabel, grafik dan gambar, untuk kemudian dibahas dalam bentuk narasi dalam menjawab tujuan yang akan dicapai dalam penelitian.

BAB V. Penutup; bagian ini akan memuat kesimpulan dan saran. Kesimpulan yang ditampilkan merupakan hasil dari pembahasan dan diskusi yang disesuaikan dengan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian. Sementara saran-saran untuk menjelaskan kekurangan-kekurangan pada saat dilakukannya penelitian sekaligus dapat menjadi perhatian pada penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka; berisi daftar acuan/sitasi yang digunakan dalam melakukan kajian penelitian yang relevan dengan penelitian ini. Daftar acuan tersebut meliputi jurnal, buku, dan literatur lainnya yang relevan.

Lampiran, berisi sumber data baik berupa data sekunder maupun primer, termasuk gambar-gambar sampel dan foto-foto hasil pengamatan penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

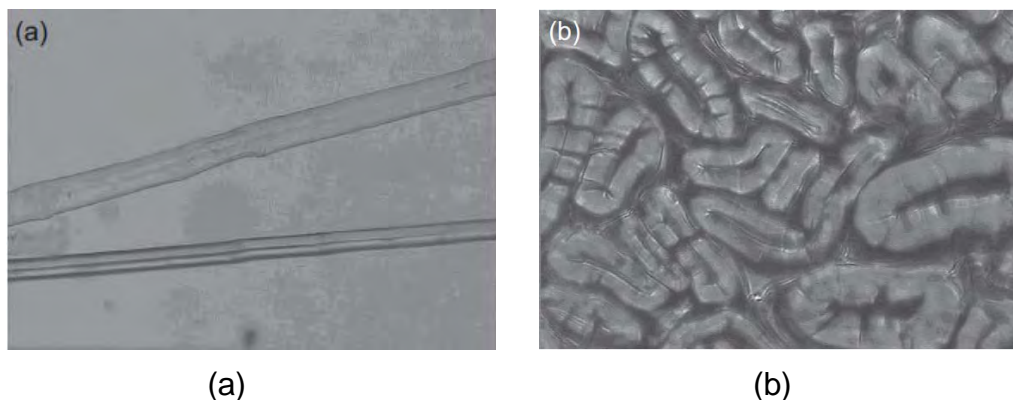
A. Serat alam rami (*Boehmeria Nivea*)

Serat rami (*Boehmeria nivea*) atau sering juga disebut sebagai “*China grass*” adalah serat alam berbasis selulosa dan telah digunakan manusia sejak 3000 S.M., sebagai bahan baku tali-temali dan kain pembungkus mumi di negara Mesir. Rami mulai dikenal di benua Eropa pada tahun 1733 diperkenalkan oleh seorang berkebangsaan Jerman bernama George Boehmer of Wittenberg. Seabad kemudian yaitu sekitar tahun 1855, tumbuhan ini mulai dikenal dan dikembangkan di wilayah Amerika Selatan. Pada tahun 1911 telah dimanfaatkan sebagai bahan baku sandang, (Maiti, 1997).

Di Asia bagian timur, tanaman rami telah dikenal sebagai tumbuhan serat tertua dan banyak dibudidayakan di negara-negara seperti Indonesia, China, Jepang dan India. Rami merupakan tumbuhan tahunan yang kuat dan dapat dipanen hingga enam kali dalam setahun. Tanaman ini tumbuh hingga ketinggian 1.2 sampai 2.5 meter. Serat rami diperoleh dari bagian luar tangkai merupakan yang terpanjang dan salah satu serat tekstil terkuat. Bentuk seratnya rata dan tidak beraturan, dengan dinding sel yang tebal berbentuk lancip dengan ujung membulat. Dinding sel primer sering mengalami lignifikasi, dan aspek ini berpengaruh terhadap karakter pis serat yang rendah, (Bismarck, *et al.*, 2005). Apabila gkan dengan serat alam yang lain, serat rami memiliki kandungan



selulosa relatif paling tinggi diantara serat alam lainnya. Serat alam dari tumbuhan memiliki sifat-sifat mekanis dimana sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia selulosa (Rowell, *et al.*, 2000). Serat rami mentah diekstraksi dari tangkai yang baru saja dipanen dengan menggunakan mesin dekortikasi yang membantu menghilangkan kulit luar dan juga menghancurkan dan menghilangkan bagian tengah kayu, getah dan wax. Serat yang diperoleh melalui proses dekortikasi adalah serat mentah yang masih mengandung hampir 25-30% getah. Namun, umumnya bebas dari jaringan kortikal. Serat ini harus dilakukan proses degumulasi untuk mendapatkan serat yang dapat dipintal. Getah rami terutama mengandung *araban* dan *xylans* (hemiselulosa) yang relatif tidak larut dalam air tetapi dapat larut dalam larutan alkali panas. Alkali membantu memecah pektin menjadi pita tanpa merusak selulosa di dalam serat. Umumnya, secara kimia *degumming* serat rami mentah diawali dengan perebusan dalam larutan alkali dan kemudian dicuci dalam air.



Gambar 1. Tampilan mikroskopik serat rami; (a) penampang memanjang; (b) penampang melintang, (Yu, 2015)



faktor-faktor seperti konsentrasi bahan kimia, suhu dan waktu akan menentukan kualitas serat *degummed*, (Yu, 2015). Seperti yang

ditunjukkan pada gambar 1, penampang memanjang serat rami mirip dengan *flax*, sedangkan tampilan penampang melintangnya mirip dengan kapas, kecuali lebarnya. Lebar sel biasanya 20–35 μm , kehalusan serat adalah 1500–2500 hitungan metrik, Komposisi sifat fisik dan kimia dari serat rami seperti ditunjukkan pada tabel 1, Sedangkan sifat mekanis pada serat rami yang belum mengalami perlakuan ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 1. Sifat fisik dan kimia serat rami, (Mohanty, *et al.*, 2000)

Cellulose (% wt)	Lignin (% wt)	Hemicellulose (% wt)	Pectin (% wt)	Wax (% wt)	Microfibrillar angle (°)	Moisture content (%)	Densitas (g/cm ³)
66.8-76.2	0.6-0.7	13.1- 16.7	1.9	0.3	7.5	8.0	1.52

Tabel 2. Perbandingan sifat mekanis dari beberapa serat alam dan sintetik, (Suddell dan Evans, 2005)

Serat	Range Diameter (μm)	Densitas (gr/cm ³)	Elongasi saat patah (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Young (GPa)
Cotton	12 - 38	1.5	7.0 – 8.0	287- 597	5.5 - 12.6
Jute	10 - 25	1.3	1.5 – 1.8	393 - 773	26.5
Flax	5 - 38	1.5	2.7 – 3.2	345 - 1035	27.6
Hemp	10 - 51	1.4	1.6	690	35
Sisal	8 - 41	1.5	2.0 – 2.5	511 - 635	9.4 - 22.0
Coir	-	1.2	30.0	175	4 – 6
Bamboo	-	0.8	-	391 - 1000	48 -89
Soft Wood	-	1.5	-	1000	40
Pineapple	-	-	1.6	413 - 1627	34.5 – 82.5
Ramie	11 - 80	1.5	3.6 – 3.8	400 - 938	61.4 – 128.0
E-Glass	10	2.5	2.5	2000-3500	70
S-Glass	10	2.5	2.8	4570	86
Aramid	12	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63 - 67
Carbon	7 - 10	1.4	1.4 -1.8	4000	230 - 240

B. Komposit Serat Alam

Komposit adalah penggabungan dari dua material atau lebih, yang terbentuk pada skala mikroskopik dan menyatu secara fisik untuk

oleh sifat-sifat baru yang tidak dimiliki oleh material pembentuknya

(006). Komposit terdiri atas penguat dan pengikat, di mana penguat



bisa berupa serat, *filament* ataupun partikulat yang diharapkan mempunyai kekuatan dan kekakuan tinggi. Sedangkan pengikat biasanya berupa resin yang berfungsi sebagai perekat atau matrik untuk menjaga posisi serat, mentransmisikan gaya geser dan juga berfungsi melindungi serat. Matrik biasanya mempunyai kekuatan relatif rendah namun memiliki keuletan tinggi, karena itu kekuatan dan kekakuan komposit sedikit banyak ditentukan oleh serat penguatnya.

Orientasi serat sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik komposit, beberapa pengaruh orientasi serat pada komposit tersebut, antara lain:

- a. **Sifat quasi-isotropic**, bila digunakan serat pendek yang diorientasikan secara acak.
- b. **Sifat anisotropic**, bila digunakan serat panjang dan diorientasikan kebeberapa arah.
- c. **Sifat orthotropic**, bila digunakan serat panjang dan diorientasikan pada arah tegak lurus.

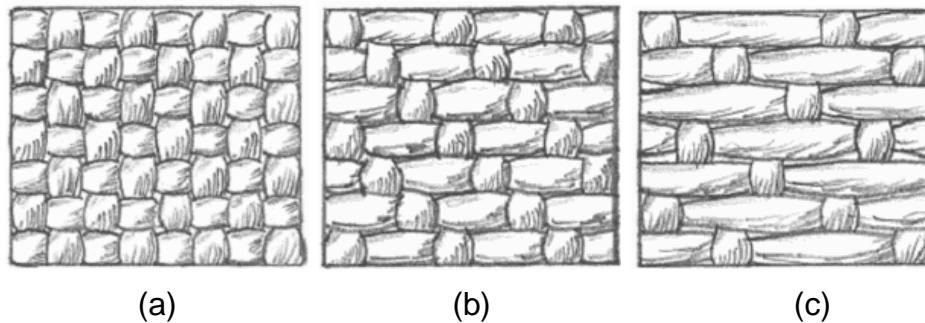
Filamen/serat kontinu dalam bentuk searah (*unidirectional*) atau bentuk tenunan (*woven*) merupakan pola utama orientasi serat pada komposit yang diperkuat serat (*fiber reinforced plastic, FRP*). Sebutan searah (*unidirectional*) mengacu pada material yang orientasi seratnya disusun dalam satu arah sedangkan struktur tenunan (*woven*) penyusunan seratnya saling berpotongan tegak lurus. Tenunan serat adalah metode

di mana dua set benang/serat yang berbeda disambungkan pada



sudut yang tepat untuk membentuk susunan atau lembaran kain. Struktur dasar tenunan (*woven*) meliputi:

- *plain weaves*: Setiap benang serat saling melewati benang serat tegak lurus lainnya,
- *twill weaves*: Setiap benang lungsin atau benang pakan mengapung melintasi dua atau lebih benang pakan atau lungsin lainnya dengan membentuk garis diagonal yang berbeda, dan
- *satin weaves*: Setiap benang lungsin/pengisi mengapung di atas 4 benang pengisi/lungsin dan *interlace* dengan benang isian/lungsin ke-5.



Gambar 2. Struktur dasar tenunan; (a) *plain weaves*; (b) *twill weaves*; (c) *satin weaves* (Textile School, 2016)

Beberapa pertimbangan dalam pemilihan serat pada komposit mengacu pada parameter seperti, nilai kekuatan dan kekakuan komposit yang diinginkan, perpanjangan ketika patah, stabilitas *thermal*, ikatan antara serat dan matrik, perilaku dinamik, perilaku jangka panjang, massa jenis, harga, biaya proses, ketersediaan dan kemudahan daur ulang, (Riedel, 1999). Serat itu sendiri diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu, serat

dan serat alam. Serat sintetik dibuat di industri dengan dimensi dan homogen. Serat sintetik memiliki kekuatan hingga 1.800 MPa, kekurangannya adalah tidak ramah lingkungan, (Shackelford,



2005). Karena alasan lingkungan tersebut para pelaku industri bidang komposit mulai melirik substitusi penggunaan serat alam sebagai pengganti serat sintetik. Hal ini juga didukung oleh beberapa keunggulan yang dimiliki serat alam, seperti massa jenis yang rendah, tidak membutuhkan energi dalam proses, lebih ramah lingkungan, mempunyai sifat insulasi panas dan akustik yang baik serta terbarukan (Brouwer, 2000).

Dalam dasawarsa terakhir ini, penggunaan serat alam pada produk komponen otomotif sangat tinggi, hal ini dipicu dengan adanya regulasi terhadap produk komponen otomotif tentang persyaratan habis pakai (*end of life*) bagi negara-negara uni Eropa dan sebagian Asia. Sejak tahun 2006, negara-negara Uni Eropa telah mendaur ulang 80% komponen otomotif, dan pada tahun 2015 diperkirakan akan meningkat menjadi 85%. Di Asia khususnya Jepang, pada tahun 2005 telah didaur ulang hingga 88% dan pada tahun 2015 meningkat menjadi 95% komponen otomotif yang didaur ulang (Holbery dan Houston, 2006).

C. Proses Manufaktur Komposit yang diperkuat Serat Alam

Pada dasarnya teknik manufaktur pada komposit serat alam memiliki kemiripan dengan komposit serat sintetik. Teknik manufaktur yang biasa digunakan adalah *hand lay up*, *compression moulding*, *injection moulding*, *RTM (resin transfer moulding)*, *SMC (sheet moulding compound)*, *filament winding* dan *pultrusi*.

Pada metode *hand lay up*, serat yang berbentuk *mats* dipotong dan diletakkan dalam cetakan, kemudian dituang resin sebagai matrik. Setelah itu diberikan tekanan dengan menggunakan rol secara manual



untuk menyebarkan matrik secara merata. Untuk menghilangkan pengaruh udara pada komposit diberikan tekanan vakum selama proses *curing*. Keunggulan proses ini adalah lebih fleksibel, teknologi sederhana dan peralatan lebih murah, namun waktu produksi lebih lama dan sulit diterapkan proses otomasi. Metode cetak-tekan (*compression moulding*) merupakan pengembangan dari metode *hand lay-up*. Metode ini banyak diterapkan dalam manufaktur komponen interior otomotif, karena prosesnya yang sederhana dan handal.

Metode RTM atau *vacuum injection* dengan teknik cetakan tertutup, dengan metode dapat diperoleh komposit dengan fraksi volume serat yang tinggi sehingga dapat diperoleh produk komposit berukuran besar dengan sifat mekanik yang baik. Perbedaan yang cukup signifikan dibanding dengan manufaktur komposit serat gelas terjadi pada proses SMC. Pada komposit serat gelas, produksi *prepreg* (*pre-impregnation*) biasanya dilakukan dengan memotong serat pendek yang dihamparkan pada permukaan resin. Pada serat alam, metode ini sangat sulit diimplikasikan karena pemotongan serat pendek yang sulit dilakukan.

Proses manufaktur pada komposit yang diperkuat serat alam sendiri pada dasarnya banyak dilakukan dengan menggunakan berbagai metode, diantaranya cetak tekan (*compression molding*), cetak injeksi (*injection molding*), *resin transfer molding* (RTM) dan *vacuum bagging*. Penguat yang digunakan umumnya menggunakan yang berbentuk serat/filamen,

woven atau *non woven*, (Njuguna *et al.*, 2011). Persamaan yang digunakan dalam preparasi pencetakan komposit adalah:



$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{(W_f/\rho_f) + (W_m/\rho_m)} \quad (1)$$

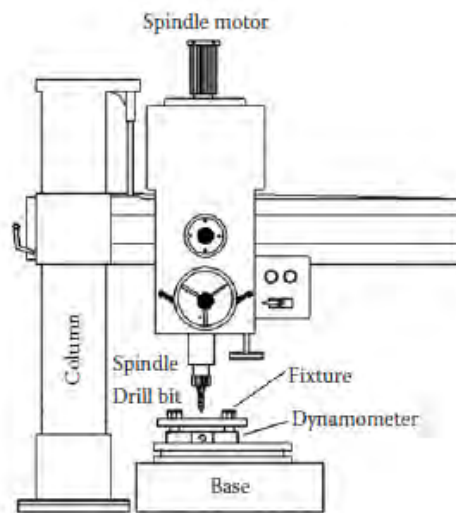
Di mana V_f adalah fraksi volume dari serat, W_f adalah fraksi berat dari serat sementara W_m adalah berat dari matrik, ρ_m dan ρ_f adalah masing-masing berat jenis matrik dan serat. Produksi komposit dapat dioptimalkan dalam hal yang berkaitan dengan suhu, tekanan dan waktu pencetakan. Suhu yang tinggi dapat menurunkan kadar selulosa, di mana akan berpengaruh negatif terhadap sifat mekanik dari komposit tersebut. Penyebaran serat yang tidak efektif akan menyebabkan aglomerasi serat yang juga berpotensi menurunkan kekuatan tarik komposit.

D. Proses Gurdi dan Kegagalan Pemesinan pada Komposit

Kebutuhan akan material komposit yang terus berkembang dan pada tahun 2017 diperkirakan akan mencapai \$ 29.9B dengan proyeksi pertumbuhan tahunan 7% (Kazmierski, 2012). Industri utama pengguna komposit adalah di bidang kedirgantaraan, konstruksi, transportasi dan energi angin. Untuk mendapat geometri akhir dari produk komposit, maka akan diperlukan proses manufaktur dan pemesinan, seperti mesin potong tepi dan mesin gurdi. Namun sangat sulit untuk memperoleh hasil yang maksimal jika dibandingkan pada proses pemesinan pada logam. Penyebab utamanya adalah ketidak-homogenan dari material, sifat *anisotropic* dan fenomena kerusakan yang rumit yang terjadi selama proses

gan. Hal ini kemudian menghasilkan permukaan akhir yang buruk, akurasi dimensi hingga penolakan komponen.





Gambar 3. Ilustrasi bagian pada proses penggurdian (Singh dan Bajpai, 2014)

Proses gurdi adalah metode pemesinan dengan cara memotong material, yang berfungsi untuk membuat lubang dengan cara memutar pahat gurdi. Proses ini melibatkan dua gerakan dasar: gerakan putar primer dan gerak pemakanan linier tambahan. Dalam operasi penggurdian horisontal, benda kerja melakukan gerakan rotasi, sementara pahat potong tersebut mengalami gerakan pemakanan (*feed*) linier. Metode ini dilakukan untuk menggurdi lubang panjang menggunakan otomatisasi, *turret*, dan pembubutan pusat. Sedangkan, dalam penggurdian vertikal, pahat potong melakukan gerakan putaran dan *feed* secara bersamaan dengan menggunakan mesin standar penggurdian. Jenis penggurdian ini adalah yang paling banyak digunakan.

Pahat gurdi diklasifikasikan berdasarkan bahan pembuatannya, metode pembuatan, panjang, bentuk, jumlah dan jenis heliks atau alur, karakteristik titik, dan rangkaian ukuran, (Abdel-gawad, 2014). Beberapa literatur, menjelaskan beberapa pendekatan dilakukan



yang mempengaruhi penurunan gaya dorong yang menyebabkan terjadinya kerusakan kritis. Beberapa pendekatan yang diberikan tersebut, mulai dari penyesuaian kontrol pemakanan (*feed rate*), geometri pahat gurdi khusus, penggunaan pelat bantu yang menopang lapisan bagian luar hingga proses gurdi menggunakan mesin tiga axis. Geometri pahat gurdi dipercaya oleh para peneliti dapat mempengaruhi terjadinya delaminasi pada komposit. Tsao dan Hocheng, (2004) dengan menggunakan analisis Taguchi pahat gurdi tipe *saw-drill* dan *brad-spur (candle stick) drill* menghasilkan kerusakan delaminasi lebih rendah dibanding tipe *twist drill*. Meskipun banyak pahat gurdi khusus dengan karakteristik geometri khusus telah direkomendasikan dalam beberapa tahun terakhir, pahat gurdi konvensional (*twist drill*) masih digunakan dalam standar industri karena pertimbangan komprehensif kinerja penggurdian, biaya pahat, serta beberapa batasan dari geometri pahat alternatif seperti kebutuhan ruang yang tersedia di lubang keluar untuk penggurdian sekali pakai dan masalah pelepasan *chip* untuk pahat gurdi inti (*core drill*), (Geng *et al.*, 2019).

Kerusakan akibat proses gurdi selain disebabkan oleh faktor material itu sendiri juga oleh ketidak-tepatan dalam menentukan parameter pemesinan. Ada beberapa parameter pemesinan yang dapat berpengaruh terhadap perilaku kerusakan material seperti, laju pemakanan (*feed rate*), kecepatan spindel, waktu gurdi (*drilling time*), gaya dorong (*thrust force*), kecepatan potong (*cutting speed*), torsi dan konsumsi daya (*power consumption*). Secara teori parameter pemesinan tersebut saling



berhubungan dan dapat diselesaikan melalui persamaan sebagai berikut, (Sumitomo, 2015):

Kecepatan potong dan kecepatan spindle:

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D_c} \quad (2)$$

Di mana N adalah kecepatan spindle (putaran per menit, rpm), V_c adalah kecepatan potong (mm/min) dan D_c adalah diameter gudi (mm).

Feed rate dan waktu gudi:

$$f = \frac{V_c}{N} \quad (3)$$

$$T = \frac{H}{V_c} \quad (4)$$

Di mana f adalah *feed rate* (mm/rev), T adalah waktu gudi (detik) sedangkan H adalah kedalaman gudi (mm). Untuk Komsumsi daya dan *thrust force*:

$$P_c = \frac{H_B \times D_c^{0.68} \times V_c^{1.27} \times f^{0.59}}{36000} \quad (5)$$

$$F = 0.24 \times H_B \times D_c^{0.95} \times f^{0.61} \times 9.8 \quad (6)$$

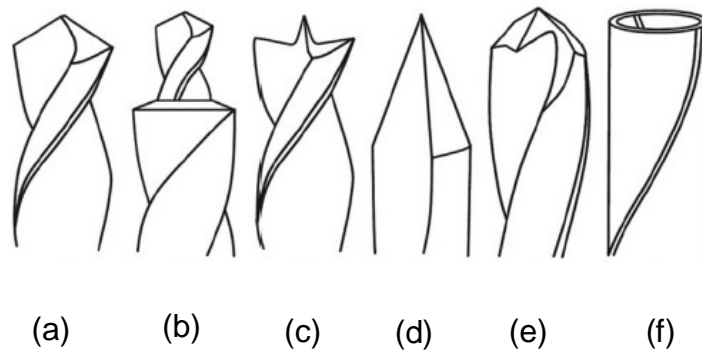
Di mana P_c adalah komsumsi daya (kW), H_B adalah kekerasan brinell, F adalah gaya dorong (*thrust force*) (N).

Tingkat pemindahan material atau dikenal dengan *material removal rate* (MRR) adalah volume material yang dipindahkan selama proses gudi per unit waktu. Untuk pahat gudi dengan diameter D_c , maka luas penampang gudi adalah $\pi D_c^2/4$. Kecepatan potong gudi tegak lurus dengan permukaan benda kerja adalah V_c yang dihasilkan oleh *feed rate* f

kecepatan spindle (N), sehingga diperoleh:

$$MRR = \frac{\pi D_c^2}{4} \times f \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (7)$$



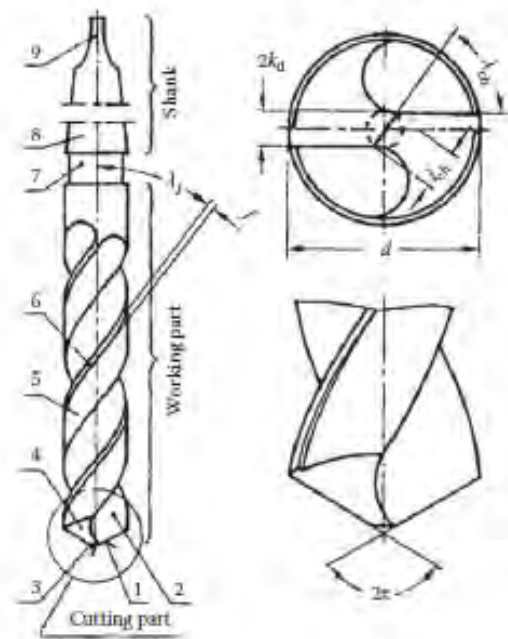


Gambar 4. Skema geometri pahat gurdi khusus yang digunakan untuk penggurdian komposit yang diperkuat serat : (a) *standard twist drill*; (b) *step drill*; (c) ***brad and spur (candle stick) drill***; (d) *dagger drill*; (e) *multi-faceted drill*; (f) *core drill*. (Schulze et al., 2011)

Karakteristik pahat gurdi ditandai sebagai berikut :

- Sudut tepi potong (*lip angle*) χ dan *double-lip angle* 2χ juga dikenal titik utama (*point angle*)
- Panjang melintang tepi potong l_{ch} dan sudut kemiringan tepi pahat λ_{ch} .
- Jarak antara tepi potong $2 l_{ch}$.
- Lebar "*land*" f_d yang memainkan peranan menghantar jejak tepi potong
- Sudut kecenderungan "*land*" λ_1 , diukur dari permukaan sekeliling diameter pahat gurdi (d). Biasa juga disebut "*inclination angle of helix flute*".

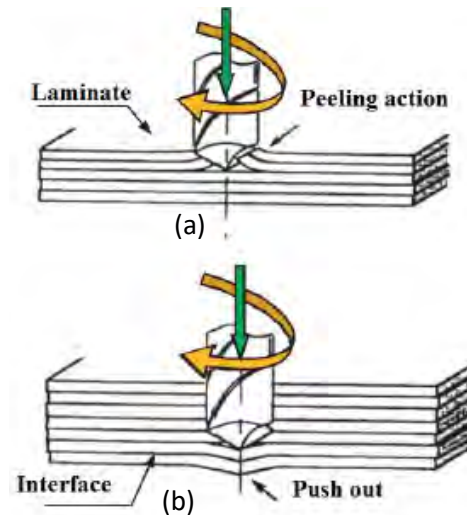




Gambar 5. Pahat gurdi dan bagian-bagiannya. 1. tepi potong; 2. face; 3. tepi pahat; 4. flank; 5. flute; 6. land; 7. alur; 8. shank taper; 9. Tang, (Abdel-gawad, 2014)

Proses gurdi merupakan operasi pemotongan 3D yang kompleks dengan kondisi pemotongan yang bervariasi sepanjang sisi potong dari sumbu hingga sisi luar. Menurut (Bosco *et al.*, 2013), selama proses pemesian gurdi pada komposit, akan muncul beragam masalah, seperti kerusakan serat penguat, terjadinya *crack* pada matrik, terlepasnya ikatan antara serat/matrik, *pull-out* pada serat, *fuzzing*, degradasi thermal, *spalling* dan delaminasi. Delaminasi yang muncul pada sisi masuk dan keluar komposit sangat penting dan harus dikurangi karena akan menurunkan kekuatan *bearing* dan stabilitas material.





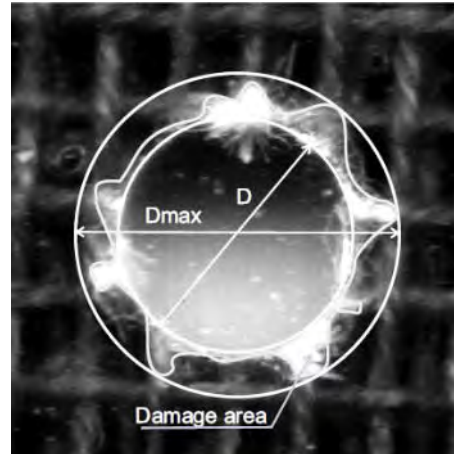
Gambar 6. Mekanisme delaminasi; (a) peel-up pada sisi masuk dan; (b) Push-out pada sisi keluar, (Kavad *et al.*, 2014).

Kerusakan dan delaminasi akibat proses gurdi (pengeboran) umumnya terjadi akibat gaya dorong (*thrust force*) dari pahat potong terhadap material komposit. Delaminasi pada proses gurdi dapat dianalisis, baik dengan mencari langsung pada faktor delaminasi ataupun dengan mencari gaya dorong atau torsi pada penggurdi material komposit. Faktor delaminasi (*delamination factor*) merupakan istilah yang sangat penting dan sering digunakan dalam industri komposit untuk mengukur kualitas lubang gurdi. Faktor delaminasi dapat dijelaskan melalui persamaan sebagai berikut:

$$F_d = \frac{\text{diameter maksimum zona delaminasi}}{\text{diameter lubang}}$$

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D} \quad (8)$$





Gambar 7. Ilustrasi definisi dan pengukuran delaminasi.

Namun, kriteria berdasarkan faktor delaminasi (F_d) umumnya memiliki inkoherensi yang melekat, karena tingkat delaminasi yang disebabkan hanya beberapa serat yang terkupas (*peel-up*) atau mengalami *push-out* melebar yang secara signifikan tidak selalu menggambarkan zona delaminasi sebenarnya pada lubang gurdian. Sehingga lebih memungkinkan menggunakan faktor delaminasi dua dimensi (F_a) untuk menggambarkan tingkat kerusakan delaminasi, (Liu, *et al.*, 2012), seperti berikut:

$$F_a = \left(\frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}} \right) \% \quad (9)$$

Di mana A_{del} area kerusakan delaminasi dan A_{nom} merupakan area nominal lubang penggurdian. Davim, *et al.* (2007), mengusulkan *adjusted delamination factor* (F_{da}) berdasarkan analisis citra digital untuk mengevaluasi delaminasi setelah penggurdian laminasi komposit.

Persamaan tersebut terdiri dari dua bagian di mana bagian pertama menunjukkan ukuran kontribusi retak, dan bagian kedua mewakili area

an. Persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut:



$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_0} + \beta \frac{A_{max}}{A_0} \quad (10)$$

Di mana A_{max} merupakan area yang berhubungan dengan maksimum diameter dari zona delaminasi dan A_0 adalah area yang dari lubang nominal (D_0). Parameter α dan β sebagai bobot dari bagian persamaan di atas, sebagaimana:

$$A_{max} = \pi \cdot \frac{D_{max}^2}{4} \quad (11)$$

$$A_0 = \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} \quad (12)$$

Apabila persamaan (9), (11) dan (12), disubstitusikan ke persamaan (10), maka akan diperoleh persamaan:

$$F_{da} = \alpha \cdot F_d + \beta \cdot F_d^2 \quad (13)$$

Dalam hal ini, β dianggap sebagai rasio area kerusakan (A_d) terhadap area yang mengacu pada D_{max} (A_{max}) dikurangi area nominal lubang (A_0). Parameter α adalah pelengkap dari β , yaitu, $\alpha = 1 - \beta$. Sehingga persamaan (2.7), dapat ditulis kembali sebagai:

$$F_{da} = (1 - \beta) \cdot F_d + \beta \cdot F_d^2 \quad (14)$$

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad (15)$$

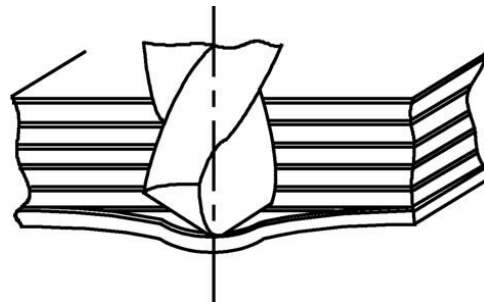
Meski begitu, F_d lebih sering digunakan daripada F_a dan F_{da} karena penggunaannya lebih praktis.

E. Model Review dalam Prediksi Delaminasi

Para peneliti sebelumnya telah memperkenalkan berbagai model untuk memprediksi kerusakan delaminasi pada material. Model analitik ortotropik telah dikembangkan untuk menentukan



gaya kritis delaminasi selama penggurdian untuk berbagai beban gabungan. Model ini memperhitungkan distribusi tekanan sepanjang sisi potong pahat yang ditentukan sebelumnya dan didasarkan pada mode dari delaminasi, (Giro, Dau dan Gutiérrez-Orrantia, 2017). Pada penggurdian komposit laminasi, ketebalan bagian yang belum terpotong akan semakin menurun pada saat mendekati sisi keluar pahat gurdi. Laminasi di bagian bawah dapat dipisahkan dari ikatan interlaminar di sekitar tepi lubang. Pada titik tertentu, pembebanan yang melebihi kekuatan ikatan interlaminar akan berdampak pada terjadinya delaminasi, (Hocheng dan Tsao, 2005).



Gambar 8. Skema penggurdian material komposit, (Hocheng dan Tsao, 2005) .

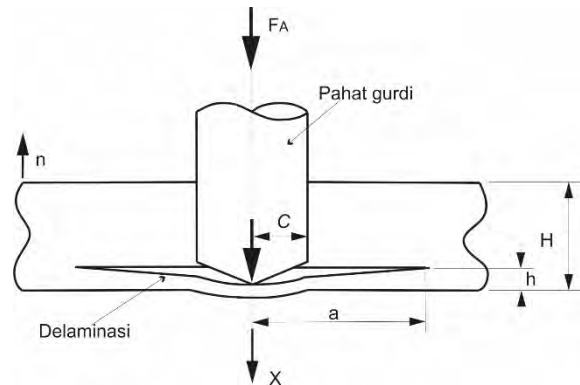
Gambar 8, menggambarkan model penggurdian material komposit. Pada perambatan delaminasi, pergerakan pahat gurdi pada jarak dX berkaitan dengan gaya dorong F_A , yang bergerak menembus spesimen dan merambatkan retak interlaminar. Dari persamaan keseimbangan energi diberikan sebagai berikut:

$$G_{IC} \cdot dA = F_A \cdot dX + dU \quad (16)$$

di mana dU adalah energi regangan yang sangat kecil, dA peningkatan area laminasi dan G_{IC} adalah energi perambatan retak kritis per unit area



dalam mode I. Nilai G_{IC} diasumsikan konstan sebagai fungsi dari laju regangan, (Hocheng and Tsao, 2005).



Gambar 9. Model *circular plate* untuk analisis delaminasi pada penggurdian dengan pahat *twist drill*.

Skema model delaminasi yang diakibatkan oleh penggurdian dengan pahat tipe *twist drill* dijelaskan pada gambar 9. Konsentrasi beban terpusat pada ujung pahat *twist drill* dengan diameter d . F_A merupakan gaya dorong (*thrust force*), X adalah *displacement*, H melambangkan ketebalan benda kerja, h adalah ketebalan benda kerja yang belum terpotong oleh pahat dan a merupakan radius dari delaminasi. Perilaku isotropik dan *bending* murni laminasi diasumsikan dalam model, pada persamaan. (16), dijabarkan dalam persamaan, (Hocheng dan Tsao, 2005).

$$dA = \pi (a + da)(a + da) - \pi a^2 = 2\pi \cdot a \cdot da \quad (17)$$

Untuk subjek *circular plate* dengan ujung yang dijepit dan mengalami beban terkonsentrasi, energi regangan U yang tersimpan adalah sebagai berikut.

$$U = \frac{8\pi \cdot M \cdot X^2}{a^2} \quad (18)$$



di mana M adalah kekakuan per satuan lebar material komposit yang diperkuat rami tenun, diberikan oleh persamaan.

$$M = \frac{E.h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (19)$$

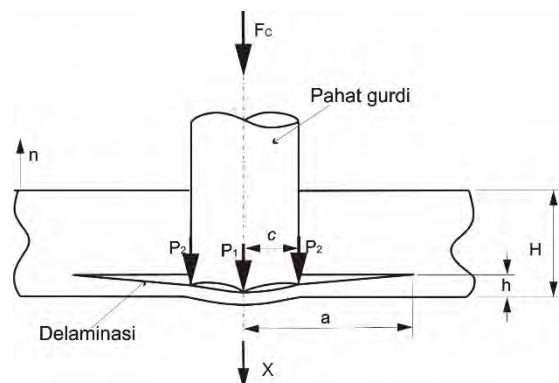
E adalah Young's modulus dan ν adalah Poisson's ratio dari material komposit yang diperkuat rami tenun. Sedangkan nilai displacement (X) diberikan oleh persamaan berikut.

$$X = \frac{F_A.a^2}{16.\pi.M} \quad (20)$$

Gaya dorong (*thrust force*) pada awal perambatan retak terjadi, kemudian diselesaikan melalui persamaan berikut, (Ho-Cheng dan Dharan, 1990).

$$F_A = \pi\sqrt{32.G_{IC}.M} = \pi \left[\frac{8.G_{IC}.E.h^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Untuk mengurangi kerusakan delaminasi yang disebabkan pengguridan, gaya dorong (*thrust force*) yang diberikan tidak boleh melebihi nilai ini, yang merupakan fungsi dari sifat material dan ketebalan yang belum terpotong. Gaya dorong dapat dikorelasikan dengan laju umpan.



10. Model *circular plate* untuk analisis delaminasi pada pengguridan dengan pahat "*brad&spurs*".



Pada penggurdian menggunakan pahat “*brad&spur*” atau biasa juga disebut *candlestick drill*, konsentrasi beban pusat terkait dengan distribusi beban sirkular. Seperti pada Gambar. 10, menggambarkan skema pahat “*brad&spurs*” dan delaminasi yang ditimbulkan. *Thrust force* pada “*brad&spur*” dapat dianggap sebagai beban pusat terkonsentrasi ditambah beban sirkular yang didistribusikan. Dengan menggunakan metode superposisi, *Thrust force* (F_C) dapat diekspresikan sebagai berikut,

$$F_C = P_1 + P_2 \quad (22)$$

di mana P_1 adalah konsentrasi beban terpusat dan P_2 adalah beban sirkular terdistribusi, seperti pada Gambar 10. Selanjutnya P_2 adalah penjabaran persamaan berikut,

$$P_2 = \alpha \cdot P_1 \quad (23)$$

Konsentrasi beban terpusat P_1 dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$P_1 = \pi \sqrt{\frac{32 \cdot G_{IC} \cdot M}{1 + \alpha^2 (1 - 2S^2 + S^4)}} \quad (24)$$

Nilai S adalah diperoleh dari c/a , sedangkan nilai α adalah rasio beban melingkar dan beban terpusat. Dengan mensubstitusikan persamaan (24) dan (23) ke persamaan (22) akan diperoleh *thrust force* kritis pahat “*brad&spur*” pada awal perambatan retakan.

$$F_C = \pi(1 + \alpha) \sqrt{\frac{32 \cdot G_{IC} \cdot M}{1 + \alpha^2 (1 - 2S^2 + S^4)}} \quad (25)$$



F. Kekuatan tarik *open-hole* pada proses pemesinan material komposit

Sifat kekuatan tarik *open-hole* merupakan salah satu hal yang penting untuk dipelajari pada proses penggurdian material komposit. Keberadaan lubang pada material dapat berdampak buruk pada kekuatan material bila dibandingkan dengan material tanpa lubang. Proses pemesinan pada material akan meninggalkan tegangan sisa terutama di daerah sekitar lubang gurdi. Tegangan sisa dapat terbentuk dari banyak metode pembuatan yang melibatkan operasi mekanis, *thermal*, *plating*, dan pemesinan. Metode ini bisa bermanfaat, merugikan atau memiliki pengaruh kecil terhadap ketahanan lelah. Selama pembebanan *inelastic* yang tidak seragam, daerah permukaan yang menghasilkan tegangan menyebabkan tekanan sisa pada permukaan yang tertimpa beban pada saat pembebanan dilepaskan. Daerah permukaan yang menghasilkan kompresi selama pembebanan *inelastic* yang tidak seragam menyebabkan tegangan tarik sisa yang tidak diinginkan saat pembebanan dilepaskan. Dua faktor utama yang mempengaruhi tegangan sisa yaitu, proses yang telah dialami komponen dan sifat material yang menghubungkan proses mekanis dengan perilaku deformasi, (Shokrieh, 2014). Distorsi komposit laminasi pada umumnya merupakan hasil dari tegangan sisa. Hal ini menyebabkan sangat pentingnya untuk memahami, mengukur, memodelkan dan mengendalikan tegangan sisa pada komposit dan material lainnya.

Tegangan sisa dapat timbul karena beberapa alasan: *pada skala mikroskopik*, dapat berasal dari perlakuan panas, pemesinan dan



pemrosesan sekunder, dan perakitan. Sedangkan *pada skala mikroskopis*, umumnya disebabkan oleh diskontinuitas antara koefisien ekspansi termal, tegangan luluh, kekakuan, atau perubahan fase (seperti terjadinya penyusutan pada saat *curing (shrinkage)*) dari konstituen yang berbeda. Dalam komponen atau bahan apa pun, kedua jenis tegangan tersebut dapat muncul bersamaan. Operasi pemrosesan paling sering menimbulkan tegangan tarik residual permukaan, yang akan mengurangi ketahanan material terhadap kelelahan. Relaksasi tegangan sisa dapat terjadi akibat deformasi plastis dan juga dari menurunnya *stress thermal*. Tegangan sisa dapat menyebabkan cacat pada struktur komposit, seperti serat, keretakan, delaminasi, *warping* dan, ketidakstabilan dimensi, (Shokrieh, 2014).

Terdapat kesulitan dalam mengukur tegangan sisa spesifik yang berkontribusi terhadap kegagalan ikatan matriks-serat. Pertumbuhan tegangan sisa menyiratkan perilaku material *nonlinier* dan sering kali memerlukan pelepasan material, transformasi fasa, dan masalah mekanis dan termal. Untuk sebagian besar masalah yang timbul, kemampuan prediksi saja tidak memadai. Oleh karena itu, pengukuran tegangan sisa sangat penting dalam memenuhi dua tujuan, yaitu:

1. meminimalkan kegagalan yang berkaitan dengan tegangan sisa; dan
2. untuk mengembangkan kemampuan prediksi melalui verifikasi model.

Seiring dengan perkembangan struktural komposit maju, maka

penting untuk melakukan penelitian dalam penentuan tegangan untuk memahami perilaku mereka. Banyak metode yang ada telah



dikembangkan untuk karakterisasi tegangan sisa dan dampaknya. Beberapa metode merupakan pengembangan dari pengujian yang telah dilakukan pada material lain, dan beberapa benar-benar baru. Metode pengujian ini dikategorikan ke dalam dua kelompok besar: destruktif dan non-destruktif.

Pengujian destruktif berimplikasi pada kerusakan atau pelepasan bagian material sehingga spesimen tidak lagi dapat digunakan. Sebaliknya pada pengujian non-destruktif tidak berimplikasi pada kerusakan spesimen dan oleh karena alasan ini pengujian ini lebih banyak disukai. Selanjutnya, dengan pengujian non-destruktif, pengujian dapat diulangi pada spesimen yang sama untuk meningkatkan akurasi, (Myers, 2004).

G. Metode Taguchi dalam optimasi parameter pemesinan

Metode Taguchi pertama kali dicetuskan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1949, metode ini dikembangkan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta dapat menekan biaya dan *resources* seminimal mungkin. Metode Taguchi merupakan *off-line quality control* artinya pengendalian kualitas yang preventif, sebagai desain produk atau proses sebelum sampai pada produksi di tingkat *shop floor*. *Off-line quality control* dilakukan pada saat awal dalam *life cycle product* yaitu perbaikan pada awal untuk menghasilkan produk (*to get right first time*).

Prosedur metode Taguchi dilakukan, untuk meminimalkan jumlah percobaan dan menyederhanakan analisis eksperimental. Metode *orthogonal array layout*, mampu memberikan informasi yang akurat kepada semua faktor yang berpengaruh terhadap kinerja



parameter. Dalam analisis Taguchi, observasi eksperimental atau *output* akan dikonversi ke dalam rasio *signal to noise* (S/N) yang sesuai. Hal ini terutama untuk mengukur deviasi dari nilai yang diinginkan terhadap kualitas karakteristik atau luaran. Ada tiga tahap dalam metode Taguchi untuk mengoptimalkan desain produk atau proses produksi, yaitu desain sistem, desain parameter, dan desain toleransi, (Ross, 1996). *Orthogonal array* digunakan untuk menentukan jumlah percobaan minimal yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin dari semua faktor yang mempengaruhi parameter. Bagian paling penting dari *orthogonal array* terletak pada pemilihan kombinasi level dari variabel input untuk setiap percobaan. Hasil percobaan kemudian dikonversi menjadi rasio *signal-to-noise* (S/N) untuk mengukur karakteristik kualitas yang menyimpang dari nilai yang diinginkan, (Mohan, *et al.*, 2007). Terdapat 3 kategori karakteristik kualitas dalam analisis rasio S/N. Ketiga kategori dan persamaan tersebut adalah:

Karakteristik *nominal is the best*:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \quad (16)$$

Karakteristik *smaller the better*:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} (\sum y^2) \quad (17)$$

Dan karakteristik *larger the better*:

$$\frac{S}{N} = -\log \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (18)$$

di mana, \bar{y} adalah rata-rata data yang diobservasi, s^2 adalah variasi dan n adalah jumlah data yang diobservasi, dan y adalah data observasi.



Pemilihan karakteristik ini sangat bergantung pada nilai yang akan dianalisis. Untuk menganalisis faktor delaminasi pendekatan karakteristik yang digunakan adalah “*smaller the better*”, namun sebaliknya rasio (S/N) yang sesuai untuk nilai kekuatan tarik *open-hole* adalah karakteristik “*larger the better*”.

H. Penggunaan Analysis of Variances (ANOVA)

ANOVA merupakan teknik statistik yang digunakan dalam analisis komparatif dalam menguji rata-rata (*means*) data dari dua atau lebih variabel. ANOVA diperkenalkan oleh Ronald Fisher pada tahun 1918, dengan mengembangkan dari *t-test* dan *z-test* yang hanya memungkinkan variabel tingkat nominal memiliki dua kategori, sehingga memungkinkan untuk perbedaan rata-rata lebih dari dua kelompok atau variabel. ANOVA adalah teknik statistik untuk menentukan tingkat perbedaan atau kesamaan antara dua atau lebih kelompok data, (Vankanti dan Ganta, 2014). Pada umumnya para peneliti dalam menganalisis data menggunakan ANOVA dalam tiga cara yaitu:

1. *one-way* ANOVA, jika variabel bebas dan variabel terikat jumlahnya satu.
2. *two-way* ANOVA, jika variabel bebas jumlahnya ada dua dan variabel terikatnya ada satu.
3. *N-way* ANOVA, jika variabel bebas jumlahnya lebih dari dua dan variabel terikatnya ada satu, biasa juga disebut sebagai *multi way*

ANOVA.



Menurut Gopalsamy, Mondal dan Ghosh, (2009), ANOVA dapat berguna untuk menentukan pengaruh dari setiap parameter input yang diberikan dari serangkaian hasil eksperimen dengan desain eksperimen untuk proses pemesinan dan dapat digunakan untuk menginterpretasikan data eksperimental. ANOVA juga dilakukan untuk menentukan proses yang akan dilakukan ataupun parameter kontrol yang secara statistik sangat signifikan terhadap pemilihan *output*, (Nasir, Azmi dan Khalil, 2015). Sebagai suatu konsep, ANOVA dapat didefinisikan bahwa setiap struktur dimensi tinggi dapat dipecah menjadi bagian dari persamaan berikut.

$$f(x) = f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{j=i+1}^n f_{i,j}(x_i, x_j) + f_{1,2} \dots \dots \dots (x) \quad (19)$$

di mana n merupakan representasi jumlah input, f_0 merupakan konstanta (*bias term*) dan term selanjutnya adalah representasi dari *univariate*, *bivariate*, *trivariate* dan seterusnya. Total variasi ANOVA dibagi sehingga menjadi komponen yang sesuai. Total jumlah kuadrat (*sum of squares*) dapat didefinisikan sesuai persamaan berikut.

$$SS_T = \sum y_i^2 \quad \text{untuk } i = 1, 2, \dots \dots, n \quad (20)$$

Persamaan ini juga dapat diperoleh dari persamaan berikut,

$$SS_T = SS_m + SS_e \quad (21)$$

di mana $SS_m = n.M^2$, adalah rata-rata jumlah kuadrat (*means sum of square*) dan $SS_e = \sum (y - M)^2$, adalah *error sum of square*, Sedangkan $M = 1/n \sum y_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Dalam kasus ANOVA dua arah (*two-way*), ketika efek interaksi faktor utama mempengaruhi nilai output,



variasi total dapat didekomposisi menjadi lebih banyak komponen sebagai berikut.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_e \quad (22)$$

di mana $SS_A = (A1 - A2)$ dan $SS_B = (B1 - B2)$ adalah variasi dari dua faktor A dan B, sedangkan $SS_{AB} = \sum (AB) i^2 / n_{ABi}$ untuk $i = 1, 2, \dots, k$, variasi karena interaksi faktor A dan B, di mana k merupakan jumlah kombinasi faktor-faktor yang berinteraksi dan n_{ABi} adalah jumlah titik data pada kondisi ini.

Saat melakukan pengujian ANOVA, derajat kebebasan (*degrees of freedom*) juga harus dipertimbangkan bersama dengan setiap jumlah kuadrat. Dalam studi ANOVA dengan kesalahan tes tertentu, penentuan varians kesalahan sangat penting. Data yang diperoleh digunakan untuk memperkirakan nilai F dari uji Fisher (F-test). Variasi yang diamati (total) dalam percobaan yang dikaitkan dengan setiap faktor atau interaksi yang signifikan tercermin dalam persentase kontribusi (P), yang menunjukkan kekuatan relatif dari suatu faktor atau interaksi untuk mengurangi variasi. Faktor dan interaksi dengan P secara substansial akan memainkan peran penting.

