

**ANALISIS PERILAKU KERUSAKAN MATERIAL KOMPOSIT
TENUNAN RAMI/RESIN *EPOXY* AKIBAT PROSES PERMESINAN**

**ANALYSIS OF DAMAGE BEHAVIOR OF WOVEN COMPOSITE
FIBER HEMP/EPOXY RESIN MATERIALS DUE TO MACHINERY
PROCESS**

TAUFIQQURRAHMAN ZULKIFLI

D022202003



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

**ANALISIS PERILAKU KERUSAKAN MATERIAL KOMPOSIT
TENUNAN RAMI/RESIN *EPOXY* AKIBAT PROSES PERMESINAN**

**ANALYSIS OF DAMAGE BEHAVIOR OF WOVEN COMPOSITE
FIBER HEMP/EPOXY RESIN MATERIALS DUE TO MACHINERY
PROCESS**

TAUFIQQURRAHMAN ZULKIFLI

D022202003



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

**ANALISIS PERILAKU KERUSAKAN MATERIAL KOMPOSIT
TENUNAN RAMI/RESIN *EPOXY* AKIBAT PROSES PERMESINAN**

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

TAUFIQQURRAHMAN ZULKIFLI

D022202003

kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2022**

TESIS

ANALISIS PERILAKU KERUSAKAN MATERIAL KOMPOSIT TENUNAN
RAMI/RESIN EPOXY AKIBAT PROSES PERMESINAN

Disusun dan diajukan oleh

TAUFIQURRAHMAN ZULKIFLI

D022202003

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Teknik Mesin Universitas Hasanuddin
pada tanggal 9 Agustus 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Komisi Penasehat

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME
NIP. 19460821 197412 1 001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Zulkifli Djafar, MT
NIP. 19650630 199103 1 004

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T.
NIP. 19750322 200212 1 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., MT.
NIP. 19730926 200012 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul “Analisis Perilaku Kerusakan Material Komposit Tenunan Rami / Resin *Epoxy* Akibat Proses Permesinan” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME dan Prof. Dr. Ir. Zulkifli Djafar., MT). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di AIP Proceeding Conference sebagai artikel dengan judul “*Ramie Fiber Woven Composite: Effect of Drill Diameter and Number of Plies on Delamination Factor*” dan “*Ramie Fiber Woven Composite: Effect of Drilling Time and Number of Plies on Thrust Force*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 19 Agustus 2022



Taufiqurrahman Zulkifli

D022202003

Ucapan Terima Kasih

Saya bersyukur bahwa tesis ini akhirnya dapat terselesaikan dengan baik. Penelitian yang saya lakukan dapat terlaksana dengan sukses dan tesis ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan (Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME sebagai pembimbing pertama dan Prof. Dr. Ir. Zulkifli Djafar., MT sebagai pembimbing kedua, serta dosen penguji dalam pelaksanaan ujian tesis. Saya mengucapkan berlimpah terima kasih kepada mereka.

Ucapan terima kasih juga saya ucapkan kepada pimpinan Universitas Hasanuddin dan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magiister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian. Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya Bapak Prof. Dr. Ir. Zulkifli Djafar., MT dan Ibu Dr. Fithriyah Arief Wangsa, ST., MT mengucapkan limpah terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada seluruh keluarga (kakak dan adik tercinta), kekasih (drg. Yunita Feby Ramadhany), teman-teman terkhus untuk anak S2 yang selalu menemani saya pada saat awal hingga selesai, serta senior dan junior Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis,

Taufiqurrahman Zulkifli

ABSTRAK

Taufiqurrahman Zulkifli, Analisis Perilaku Kerusakan Material Komposit Tenunan Rami/Resin *Epoxy* Akibat Proses Permesinan (dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME dan Prof. Dr. Ir. Zulkifli Djafar., MT)

Delaminasi merupakan masalah utama yang paling sering timbul pada proses permesinan material komposit. Tanaman rami dikenal sebagai *reinforcement fiber* dalam industri komposit, memiliki sifat yang unggul dan dinilai mampu menjadi solusi dari keterbatasan masalah terhadap kerusakan pada proses permesinan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah lapisan, diameter gurdi, *feed rate* dan kecepatan spindel terhadap kerusakan pada proses permesinan material komposit tenunan serat rami/resin *epoxy* dengan menggunakan faktor delaminasi sebagai parameter korelasi dan dianalisis menggunakan metode Taguchi dan ANOVA. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental dimana jumlah spesimen diuji dengan penguat 3, 4, dan 5 lapis serat tenunan rami sebanyak 567 spesimen dengan rincian 189 spesimen/variasi lapis. Variasi diameter gurdi 6, 8, dan 10 mm dengan kecepatan *spindle* 88, 455, dan 1500 rpm, serta *feed rate* 0.05, 0.09, dan 0.15 mm/rev sebanyak 63 spesimen. Hasil penelitian yang diperoleh nilai faktor delaminasi rata-rata untuk penguat 3 lapis dengan *feed rate* 0.05, 0.09 dan 0.15 mm/rev yaitu 1.037 ± 0.004 , 1.057 ± 0.019 dan 1.049 ± 0.024 , penguat 4 lapis yaitu 1.046 ± 0.022 , 1.062 ± 0.017 dan 1.065 ± 0.009 dan penguat 5 lapis yaitu 1.056 ± 0.012 , 1.058 ± 0.02 dan 1.081 ± 0.024 . Nilai optimal yang diperoleh dari analisis metode Taguchi ketika nilai S/N paling terkecil dan *mean* mendekati angka 1. *Error* dari penelitian menggunakan ANOVA paling besar yaitu 10.2%. Kesimpulan penelitian ini adalah jumlah lapisan, diameter gurdi, *feed rate* dan kecepatan spindel memiliki pengaruh cukup besar terhadap komposit tenunan serat rami, dan peningkatan nilai faktor delaminasi dapat mempengaruhi kekuatan tarik.

Kata Kunci: Komposit Tenunan Serat Rami, Resin Epoxy, Faktor delaminasi, Metode Taguchi, ANOVA, Uji tarik

ABSTRACT

Taufiqurrahman Zulkifli, Analysis of Damage Behavior of Woven Composite Fiber Hemp/Epoxy Resin Materials Due to Machinery Process (supervised by Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME and Prof. Dr. Ir. Zulkifli Djafar., MT)

Delamination is the main problem that most often arises in the machining process of composite materials. Hemp plant is known as a fiber reinforcement in the composite industry, has superior properties and it is considered to be a solution for the limited problem of damage due to the machining process. The purpose of this study was to determine the effect of the plies number, drill diameter, feed rate and spindle speed on damage to the machining process of woven composites hemp fiber/epoxy resin materials using the delamination factor as a correlation parameter and we analyzed using the Taguchi and ANOVA methods. The research method used an experimental method in which the number of specimens tested with 3, 4, and 5 plies of woven composites hemp fiber as many as 567 specimens with details of 189 specimens/variation of plies. Variations in the diameter of the drill 6, 8, and 10 mm with spindle speeds of 88, 455, and 1500 rpm, and feed rates of 0.05, 0.09, and 0.15 mm/rev were 63 specimens. The results obtained that the average delamination factor values for 3 plies reinforcement with feed rates of 0.05, 0.09 and 0.15 mm/rev were 1.037 ± 0.004 , 1.057 ± 0.019 and 1.049 ± 0.024 , 4 plies reinforcement were 1.046 ± 0.022 , 1.062 ± 0.017 and 1.065 ± 0.009 and 5 plies of reinforcement are 1.056 ± 0.012 , 1.058 ± 0.02 and 1.081 ± 0.024 . The optimal value obtained from the analysis of the Taguchi method when the S/N value is the smallest and the mean is close to 1. The error from the study using ANOVA is the largest, which is 10.2%. The conclusion of this study is that the number of plies, drill diameter, feed rate and spindle speed have a large enough influence on woven composites hemp fiber, and it can increase the value of the delamination factor for affect the tensile strength.

Keywords: Woven composite fiber hemp, Epoxy resin, Delamination factor, Taguchi method, ANOVA, Tensile test

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Tinjauan Umum Tentang Serat Rami	4
2.2 Karakteristik Tanaman Rami	5
2.3 Tinjauan Umum Tentang Komposit	7
1. Klasifikasi Material Komposit	8
2.4 Proses Gurdi dan Kegagalan Pemesinan pada Komposit	10
1. <i>Cutting Speed</i>	11
2. <i>Feed Rate</i>	12
3. <i>Cutting Force</i>	12
4. <i>Material Removal</i>	13
2.5 Model Revie dalam Prediksi Delaminasi	14
2.6 Kekuatan Tarik Sisa (<i>Residual Tensile Strength</i>) pada Proses Permesinan Material Komposit	16
2.7 Penggunaan <i>Analysis of Variances</i> (ANOVA).....	18
2.8 Metode Taguchi dalam Optimasi Parameter Permesinan	20

BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	22
3.2 Alat dan Bahan	22
3.3 Metodologi Penelitian	27
3.4 Pelaksanaan Penelitian	28
3.5 Diagram Alur Penelitian	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Faktor Delaminasi	34
1. Hasil Perhitungan Faktor Delaminasi	34
2. Analisis Faktor Delaminasi Terhadap Variasi Jumlah Lapisan dan <i>Feed Rate</i>	37
3. Analisis dengan Menggunakan Metode Taguchi	52
4. Analisis dengan Menggunakan Metode ANOVA	56
4.2 Pengujian Tarik <i>Open Hole</i>	58
1. Hasil Pengujian Tarik <i>Open Hole</i> pada Komposit Tenunan Serat Rami	60
2. Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Lapis Terhadap Kekuatan Tarik Komposit Tenunan Serat Rami	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN I	83
LAMPIRAN II	117
LAMPIRAN III	126
LAMPIRAN IV	140

DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
1. Beberapa karakteristik kimia dan fisika serat rami dibandingkan serat-serat selulosa lainnya	6
2. Waktu penelitian.....	22
3. Merupakan nilai rata-rata hasil perhitungan faktor delaminasi pada penggurdian komposit tenunan serat rami.	34
4. Faktor kontrol dan <i>level</i> penelitian	52
5. <i>L9 orthogonal array</i>	53
6. Hasil perhitungan berdasarkan <i>L9 orthogonal array</i> sisi masuk dan keluar.....	53
7. Faktor kontrol sesuai dengan format <i>L9 orthogonal array</i>	56
8. Kontribusi tiap-tiap faktor kontrol sisi masuk	57
9. Kontribusi tiap-tiap faktor kontrol sisi keluar	58
10. Nilai rata-rata hasil pengujian tarik <i>open hole</i> pada komposit tenunan serat rami	60

DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
1. Koleksi tanaman rami	6
2. <i>Paticulate composite</i>	8
3. <i>Continous fiber composite</i>	9
4. <i>Woven fiber composite</i>	9
5. <i>Chopped fiber composite</i>	9
6. <i>Hybrid composite</i>	10
7. <i>Laminates composites</i>	10
8. <i>Cutting force</i> dalam proses penggurdian.....	12
9. Skema geometri pahat gurdi khusus yang digunakan untuk penggurdian komposit yang diperkuat serat: (a) <i>standard twist drill</i> ; (b) <i>step drill</i> ; (c) <i>brad and spur (candle stick) drill</i> ; (d) <i>dagger drill</i> ; (e) <i>multi-faceted drill</i> ; (f) <i>core drill</i>	13
10. Mekanisme delaminasi; (a) <i>peel-up</i> pada sisi masuk dan; (b) <i>Push- out</i> pada sisi keluar	14
11. Skema penggurdian material komposit	15
12. Model circular plate untuk analisis delaminasi pada penggurdian dengan pahat " <i>brad & spurs</i> "	15
13. Timbangan digital	22
14. Oven listrik.....	23
15. Box kedap udara	23
16. Alat press cetakan.....	23
17. Cetakan baja	24
18. Dongkrak hidrolik	24
19. Gelas ukur	24
20. Gelas plastik.....	25
21. <i>Scroll saw</i>	25
22. Gurdi <i>brad and spurs dill</i>	25
23. Mesin gurdi TPR 1100	26
24. Mesin uji tarik	26
25. Serat rami.....	26
26. Resin epoksi <i>hardener</i>	27
27. <i>Mold realse wax merk "Mirror Glaze"</i>	27

28. Pola ASTM D 5766/D 5766M – 02	30
29. Diagram alir penelitian	32
30. Hubungan antara faktor delaminasi sisi masuk terhadap variasi jumlah lapisan penguat diameter 6 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) rpm dan (c) 1500 rpm	38
31. Hubungan antara faktor delaminasi sisi keluar terhadap variasi jumlah lapisan penguat diameter 6 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) rpm dan (c) 1500 rpm	40
32. Hubungan antara faktor delaminasi sisi keluar terhadap variasi jumlah lapisan penguat diameter 8 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) rpm dan (c) 1500 rpm	44
33. Hubungan antara faktor delaminasi sisi keluar terhadap variasi jumlah lapisan penguat diameter 8 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) rpm dan (c) 1500 rpm	46
34. Hubungan antara faktor delaminasi sisi masuk terhadap variasi jumlah lapisan penguat diameter 10 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) rpm dan (c) 1500 rpm	48
35. Hubungan antara faktor delaminasi sisi keluar terhadap variasi jumlah lapisan penguat diameter 10 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) rpm dan (c) 1500 rpm	51
36. Nilai <i>S/N low is better</i> sisi masuk dari faktor kontrol dan variasi (<i>level</i>) pada komposit tenunan rami	54
37. Nilai <i>Mean of Means</i> sisi masuk dari faktor kontrol dan variasi (<i>level</i>) pada komposit tenunan rami	54
38. Nilai <i>S/N low is better</i> sisi keluar dari faktor kontrol dan variasi (<i>level</i>) pada komposit tenunan rami	55
39. Nilai <i>Mean of Means</i> sisi keluar dari faktor kontrol dan variasi (<i>level</i>) pada komposit tenunan rami	55
40. Kontribusi tiap-tiap faktor kontrol pada sisi masuk penggurdian	57
41. Kontribusi tiap-tiap faktor kontrol pada sisi keluar penggurdian	58
42. Patahan komposit setelah pengujian tarik	59
43. Hubungan antara kekuatan tarik dan variasi jumlah lapisan penguat pada diameter 6 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm	64

44. Hubungan antara kekuatan tarik dan variasi jumlah lapisan penguat pada diameter 8 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm	66
45. Hubungan antara kekuatan tarik dan variasi jumlah lapisan penguat pada diameter 10 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm	69
46. Hubungan antara regangan tarik dan variasi jumlah lapisan penguat pada diameter 6 mm, <i>feed rate</i> 0,05 mm/rev dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm	72
47. Hubungan antara regangan tarik dan variasi <i>feed rate</i> pada komposit 3 lapis, diameter 6 mm dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm dan (c) 1500 rpm	73
48. Hubungan antara regangan tarik dan variasi diameter gurdi pada komposit 3 lapis, <i>feed rate</i> 0,05 mm/rev dan kecepatan spindel (a) 88 rpm, (b) 455 rpm, dan (c) 1500 rpm	75

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor urut	Halaman
1. Data hasil pengukuran <i>D</i> _{maks} dan faktor delaminasi pada setiap spesimen	83
2. Dokumentasi hasil <i>scan</i> dan visualisasi bentuk kerusakan pasca penggurdian.....	117
3. Hasil pengujian Tarik <i>open hole</i>	126
4. Foto dokumentasi penelitian	140

DAFTAR NOTASI

Notasi	Arti dan penjelasan
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (organisasi standard internasional)
a	Radius dari delaminasi
D	Diameter
D_{max}	Diameter <i>Maximum</i> Zona Delaminasi
dA	Peningkatan Area Retak Delaminasi
dU	Energi Regangan yang Sangat Kecil
dX	Pergerakan Pahat Gurdi pada Jarak
E	<i>Young's Modulus</i>
F	Gaya Dorong (<i>thrust force</i>), N
F_A	Gaya Dorong
F_c	<i>Thrust Force</i> kritis
F_d	Faktor Delaminasi
f	<i>Feed rate</i> , mm/rev
G_{IC}	Energi Perambatan Retak
M	Kekakuan per satuan lebar material komposit yang diperkuat rami tenun
MPa	Mega pascal
MPa	Satuan tegangan, megapascal
MRR	<i>Material removal rate</i>
mm	Satuan jarak, millimeter
mm/rev	Satuan <i>feed rate</i> , millimeter per revolution
mm^2	Satuan luas, millimeter bujur sangkar

N	Kecepatan Rotasi
N	Satuan gaya, Newton
n	Jumlah data yang diobservasi
P_1	Konsentrasi Beban Terpusat
P_2	Beban Sirkular Terdistribusi
S	Kecepatan Spindel
S	Konstanta rasio c/a
S/N	<i>Ratio signal to noise</i>
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>)
ν	<i>Poisson's Ratio</i>
V	Kecepatan Periferal
X	<i>Displacement</i>

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanaman rami merupakan tanaman yang dapat tumbuh di berbagai kondisi lahan. Tanaman rami juga mudah beradaptasi dengan lingkungan dan relatif tahan terhadap serangan hama. Tanaman rami dapat menghasilkan serat dari kulit kayunya, secara kimia rami diklasifikasikan ke dalam jenis serat selulosa sama halnya seperti kapas, linen, *hemp* dan lain-lain. Rami memiliki sejumlah keunggulan yang membedakannya dengan serat batang lainnya. Rami memiliki kompatibilitas yang baik dengan seluruh jenis serat baik serat alam maupun sintetis sehingga mudah untuk dicampur dengan jenis serat apapun. Pemanfaatan serat rami kini semakin meluas. Salah satunya sebagai serat penguat (*reinforcement fiber*) pada industri komposit. Konsumsi serat alam untuk produk komposit di Eropa bahkan diperkirakan mengalami peningkatan 10% setiap tahunnya. Sebagai contoh, di Eropa penggunaan serat alam untuk bahan baku komposit pada tiap unit kendaraan dapat mencapai 5-10 kg (Novarini dan Sukardan, 2015).

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 lainnya. 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.

Komposit rami merupakan perpaduan antara serat tanaman rami dengan bahan perekat yang masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda, dengan perpaduan itu akan menghasilkan material baru yang memiliki sifat yang lebih baik dikarenakan kedua bahan penyusun dapat saling melengkapi kekurangan masing-masing. Beberapa peneliti telah memakai serat rami sebagai salah satu bahan dasar pembuatan komposit seperti, Djafar Z (2015) mengenai komposit yang diperkuat tenunan rami jenis *Basket* tipe S 3/12 dan *Epoxy Resin Bisphenol A* tipe *Bakelite EPR 174* dan *Epoksi Hardener*

Versamid-140, Chandrabakty *et al.*, (2019) menganalisis perilaku kerusakan (delaminasi) pada komposit serat rami akibat dari proses pemesian.

Pada proses pemesian material komposit seperti penggurdian ada beberapa masalah yang timbul adalah *matrix cratering*, *fiber pull-out*, kerusakan termal dan delaminasi. Ketidaktepatan dalam memilih parameter proses pemesian yang digunakan adalah salah satu penyebab dari timbulnya masalah tersebut. Dari beberapa masalah pada penggurdian 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 pemesian yang digunakan. Dengan begitu delaminasi 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 *et al.*, 2019).

Walaupun begitu, penelitian mengenai efek permesinan pada komposit dengan penguat serat rami masih sangat minim. Dari beberapa paparan di atas maka penelitian mengenai efek permesinan pada komposit dengan penguat serat rami memiliki potensi yang menjanjikan dimasa depan. Maka hal ini yang mendasari peneliti untuk melakukan penelitian yang berjudul **“ANALISIS PERILAKU KERUSAKAN MATERIAL KOMPOSIT TENUNAN RAMI/RESIN EPOXY AKIBAT PROSES PERMESINAN”**.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan, diameter gurdi, *feed rate* dan kecepatan spindel terhadap kerusakan pada proses permesinan material komposit tenunan rami / resin *epoxy*?
2. Berapa besar pengaruh jumlah lapisan, diameter gurdi, *feed rate* dan kecepatan spindel terhadap kerusakan pada proses permesinan material komposit tenunan rami / resin *epoxy* dengan menggunakan metode Taguchi dan ANOVA?
3. Bagaimana pengaruh kerusakan hasil proses permesinan terhadap kekuatan tarik material komposit tenunan rami / resin *epoxy*?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh jumlah lapisan, diameter gurdi, *feed rate* dan kecepatan spindle terhadap kerusakan pada proses pemrosesan material komposit tenunan rami / resin *epoxy*.
2. Mengetahui seberapa besar pengaruh jumlah lapisan, diameter gurdi, *feed rate* dan kecepatan spindle terhadap kerusakan pada proses pemrosesan material komposit tenunan rami / resin *epoxy* dengan menggunakan metode Taguchi dan ANOVA
3. Mengetahui pengaruh kerusakan hasil proses pemrosesan terhadap kekuatan tarik material komposit tenunan rami / resin *epoxy*.

1.4 Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat seperti:

1. Diharapkan dapat berkontribusi dalam perkembangan ilmu dan teknologi manufaktur bidang rekayasa material khususnya komposit alam.
2. Diharapkan dapat memberikan pertimbangan ataupun acuan dalam memilih jumlah lapisan penguat dan parameter pemrosesan 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 dilakukan pada sisi masuk dan sisi keluar pahat gurdi.
4. Melakukan pendekatan statistik dengan metode Taguchi dan ANOVA untuk mendapatkan parameter proses pemrosesan untuk mengoptimalkan hasil produksi.

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, Cameroons, Barat india, Meksiko, dan negara-negara selatan di Utara Amerika, Eropa Selatan (Jose *et al.*, 2016). Kondisi geografis serta demografis di Indonesia sangat sesuai untuk budidaya tanaman rami. Indonesia telah memiliki varietas unggul tanaman rami yang dinamakan Ramindo 1 [dahulu Pujon 10] asal Pujon, Malang, Jawa Timur (Novarini dan Sukardan, 2015). Rami merupakan tanaman yang serbaguna 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), di mana sejarah awal diketahui dari beberapa pembungkus mumi dari tahun 500–3300 SM telah menggunakan serat rami. Namun tidak ada catatan asli mengenai pemanfaatan rami di Mesir, berbagai sumber menyebutkan bahwa Rami merupakan 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 linen, 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 *et al.*, 2015).

2.2 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 tinggi tanaman rata-rata 1,8 meter dengan ketebalan batang 1,2 cm (Djafar *et al.*, 2018).

Bunga tanaman rami berumah satu pada satu bunga terdapat satu jenis sel kelamin atau *monoecius* tumbuh berkembang pada ketiak daun berwarna putih kehijauan. Bungannya kecil bergerombol terkulai ke bawah. Penyerbukan bunga rami banyak dibantu oleh angin. Bunga jantan tumbuhnya pada bagian bawah batang sedangkan bunga betina berada pada bagian atas batang (M. Subandi, 2017). Gambar tanaman rami dapat dilihat pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Koleksi tanaman rami.

Sumber: Felixia Amanda, 2018. <https://bobo.grid.id/read/08682377/tanaman-rami-dijadikan-bahan-makanan-sejak-6000-tahun-sebelum-masehi?page=2>.

Tanaman rami atau yang dikenal dengan sebutan *China grass* tergolong ke dalam kelompok serat batang. Tanaman rami menghasilkan serat dari kulit kayunya. Secara kimia rami diklasifikasikan ke dalam jenis serat selulosa sama halnya seperti kapas, linen, *hemp* dan lain-lain. Rami memiliki sejumlah keunggulan yang membedakannya dengan serat batang lainnya. Rami memiliki kompatibilitas yang baik dengan seluruh jenis serat baik serat alam maupun sintesis sehingga mudah untuk dicampur dengan jenis serat apapun. Karakteristik serat rami dan serat selulosa lain dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa karakteristik kimia dan fisika serat rami dibandingkan serat-serat selulosa lainnya.

Karakteristik	Rami	Kapas	Hemp	Flax
Average ultimate fibre length (mm)	120-150	20-30	15-25	13-14
Average ultimate fibre diameter (μ)	40-60	14-16	15-30	17-20
Tensile strength (kg/mm ²)	95	45	83	78
Moisture regain (%)	12	8	12	12
Cellulose	72-97 ⁺	88-96	67-78	64-86
Lignin	1-0	0	6-4	5-1
Hemicellulose, pektin, etc	27-3	12-4	27-18	31-14

Sumber: Novarini dan Sukardan, 2015. Potensi Serat Rami (*Boehmeria Nivea* S. Gaud) Sebagai Bahan Baku Industri Tekstil dan Produk Tekstil dan Tekstil Teknik. Vol. 30 No. 2, Desember 2015: 114-116.

Jika dibandingkan dengan kapas, *flax* dan *hemp*, maka rami memiliki kekuatan yang paling tinggi. Marsyahyo *et al.* memanfaatkan keunggulan kekuatan serat rami untuk membuat panel tahan peluru dari komposit serat rami (Novarini dan Sukardan, 2015). Dimensi serat rami tidak berubah pada kenaikan kelembaban hingga 25%. Daya serap terhadap airnya (*moisture regain*) terbilang tinggi yaitu 12%, sedangkan daya serap kapas hanya 8%. Daya serap yang lebih tinggi ini menjadikan rami lebih mampu menyerap cairan tubuh seperti keringat. Oleh karena itu, rami sangat sesuai untuk

digunakan sebagai pakaian musim panas. Rami juga memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan bakteri, jamur, serangga dan pelapukan, stabilitas dimensi tinggi, serta ketahanan luntur warna yang baik terhadap sinar dan pencucian. Dengan berbagai keunggulan dan beberapa sifatnya yang menyerupai serat kapas, serat rami diharapkan akan sesuai apabila dijadikan sebagai alternatif penghasil serat selulosa untuk mengurangi ketergantungan terhadap kapas impor.

2.3 Tinjauan Umum Tentang Komposit

Menurut Gibson (1994) komposit adalah perpaduan dari bahan yang dipilih berdasarkan kombinasi sifat fisik masing-masing material penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan dengan sifat material dasar sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan antara masing-masing material penyusun. Dari campuran tersebut akan dihasilkan material komposit yang mempunyai sifat mekanik dan karakteristik yang berbeda dari material pembentuknya (Gibson, 1994). Komposit dibentuk dari dua jenis material yang berbeda, yaitu:

1. Penguat (*reinforcement*), yang mempunyai sifat kurang elastis tetapi lebih kaku serta lebih kuat, dalam laporan ini penguat komposit yang digunakan yaitu dari serat alam.
2. Matriks, umumnya lebih *ductile* tetapi mempunyai kekuatan dan kekakuan yang lebih rendah

Secara garis besar ada 3 macam jenis komposit berdasarkan penguat yang digunakannya, yaitu:

1. *Fibrous Composites* (Komposit Serat) merupakan jenis komposit yang hanya terdiri dari satu laminat atau satu lapisan yang menggunakan penguat berupa serat atau fiber. Fiber yang digunakan bisa berupa *glass fibers, carbon fibers, aramid fibers (poly aramide)*, dan sebagainya. Fiber ini bisa disusun secara acak maupun dengan orientasi tertentu bahkan bisa juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyaman.
2. *Laminated Composites* (Komposit Laminat) merupakan jenis komposit yang terdiri dari dua lapis atau lebih yang digabung menjadi satu dan setiap lapisnya memiliki karakteristik sifat sendiri.

3. *Particulate Composites* (Komposit Partikel) merupakan komposit yang menggunakan partikel/serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriksnya.

1. Klasifikasi Material Komposit

Klasifikasi komposit dapat dibentuk dari sifat dan strukturnya. Bahan komposit dapat diklasifikasikan kedalam beberapa jenis. Secara umum klasifikasi komposit sering digunakan antara lain seperti:

1. Komposit berdasarkan matriksnya

Berdasarkan matriksnya komposit digolongkan menjadi 3 (Gibson, 1994), yaitu:

- a. *Metal Matrix Composite* (MMC)

Komposit ini menggunakan suatu logam seperti aluminium sebagai matrik dan penguatnya dengan serat seperti *silicon karbida*.

- b. *Polymer Matrix Composite* (PMC)

Komposit ini menggunakan suatu polimer berbahan resin sebagai matriksnya dan suatu jenis serat seperti kaca, karbon dan aramid (Kevlar) sebagai penguatnya.

- c. *Ceramic Matrix Composite* (CMC)

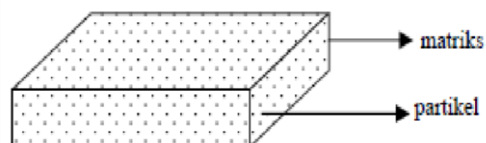
Komposit ini menggunakan keramik sebagai matrik seperti *Alumina*, *silicon nitride*, dan keramik gelas yang diperkuat dengan serat pendek atau serabut-serabut (*whiskers*) di mana terbuat dari *silicon karbida* atau *boron nitride*.

2. Komposit berdasarkan unsur penguatnya

Berdasarkan unsur penguatnya komposit digolongkan menjadi 3, yaitu:

- a. Komposit partikel (*Particulate Composite*)

Komposit partikel merupakan komposit yang menggunakan partikel serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriksnya.



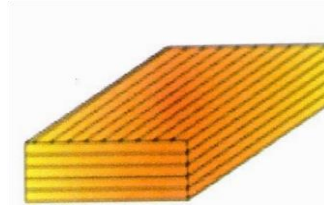
Gambar 2. *Particulate composite.*

Sumber: Gibson, R.F., 1994. *Principle Of Composite Material Mechanic.* McGraw-Hill International Book Company, New York.

b. Komposit serat (*Fibrous Composite Material*)

Komposit serat merupakan komposit yang menggunakan serat sebagai penguatnya. Kebutuhan akan penempatan serat dan arah serat yang berbeda menjadikan komposit diperkuat serat dibedakan lagi menjadi beberapa bagian diantaranya yaitu:

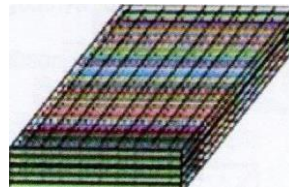
- 1) *Continuous fiber composite* (komposit diperkuat serat kontinyu)



Gambar 3. *Continuous fiber composite.*

Sumber: Gibson, R.F., 1994. *Principle Of Composite Material Mechanic.* McGraw-Hill International Book Company, New York.

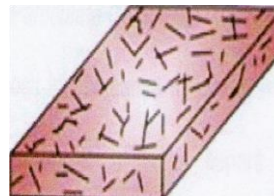
- 2) *Woven fiber composite* (komposit diperkuat serat anyaman)



Gambar 4. *Woven fiber composite.*

Sumber: Gibson, R.F., 1994. *Principle Of Composite Material Mechanic.* McGraw-Hill International Book Company, New York.

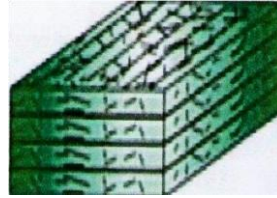
- 3) *Chopped fiber composite* (komposit diperkuat serat pendek / acak)



Gambar 5. *Chopped fiber composite.*

Sumber: Gibson, R.F., 1994. *Principle Of Composite Material Mechanic.* McGraw-Hill International Book Company, New York.

- 4) *Hybrid composite* (komposit diperkuat serat kontinyu dan acak)

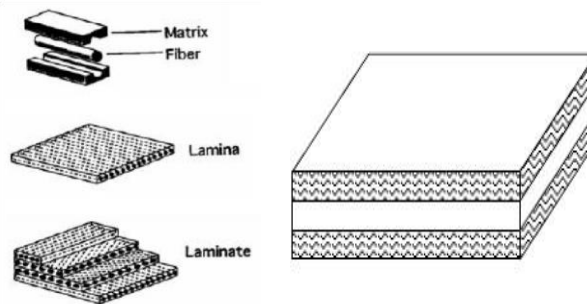


Gambar 6. *Hybrid composite.*

Sumber: Gibson, R.F., 1994. *Principle Of Composite Material Mechanic.* McGraw-Hill International Book Company, New York.

c. Komposit lapis (*Laminated Composite Materials*)

Komposit lapis merupakan jenis komposit terdiri dari dua lapis atau lebih yang digabung menjadi satu dan setiap lapisnya memiliki karakteristik tersendiri (Gambar 7).



Gambar 7. *Laminates composites.*

Sumber: Gibson, R.F., 1994. *Principle Of Composite Material Mechanic.* McGraw-Hill International Book Company, New York.

2.4 Proses Gurdi dan Kegagalan Pemesinan pada Komposit

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* (Xu *et al.*, 2019), namun faktanya untuk melakukan perakitan, material komposit harus melalui proses pemrosesan dengan membuat sejumlah lubang gurdi (Ghasemi, Khorasan dan Gibson, 2018) di mana 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 di mana benda kerja dibentuk dengan menghilangkan bahan yang tidak diinginkan. Penggurdian 2D 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).

Proses gurdi adalah metode pemessinan 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 horizontal, 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.

1. 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). Di mana hubungan antara kecepatan pakan dengan rotasi alat potong dirumuskan dalam persamaan 1:

$$V = \frac{\pi DN}{1000} \quad (1)$$

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 persamaan 2:

$$S = \frac{1000V}{\pi D} \quad (2)$$

Kecepatan pemotongan yang optimal dapat disesuaikan untuk kinerja yang lebih baik, tergantung pada faktor-faktor seperti bahan komposit meliputi

kekerasan dan 30 stabilitas termal, kedalaman lubang serta kualitas akhir yang diinginkan, kekakuan alat potong dan orientasi penggurdian (Ismail, 2017).

2. Feed Rate

Feed rate mengacu pada tingkat di mana alat gudi maju sepanjang geometri benda kerja, biasanya diukur dalam mm/menit. Di mana ini menandakan tingkat di mana bahan benda kerja dimasukkan ke dalam mata gudi tanpa menyebabkan kemacetan dengan persamaan 3:

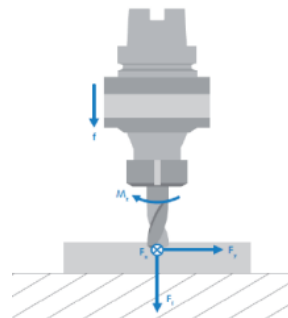
$$F = S \times f \times N \quad (3)$$

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

Selain itu, *feed rate* adalah parameter standar untuk diameter gudi 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).

3. Cutting Force

Cutting force mengacu pada gaya kontak yang dihasilkan oleh ujung pahat terhadap permukaan benda kerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. *Cutting force* dalam proses penggurdian.

Sumber: Ismail, S. O., 2017. *Machinability Analysis of Drilling -Induced Damage on Fiber Reinforced Polymer Composite.*

Dari gambar 8 M_z : momen penggurdian, F_x : arah gaya potong sumbu x, F_y : arah gaya potong sumbu y dan F_f : *feed force*.

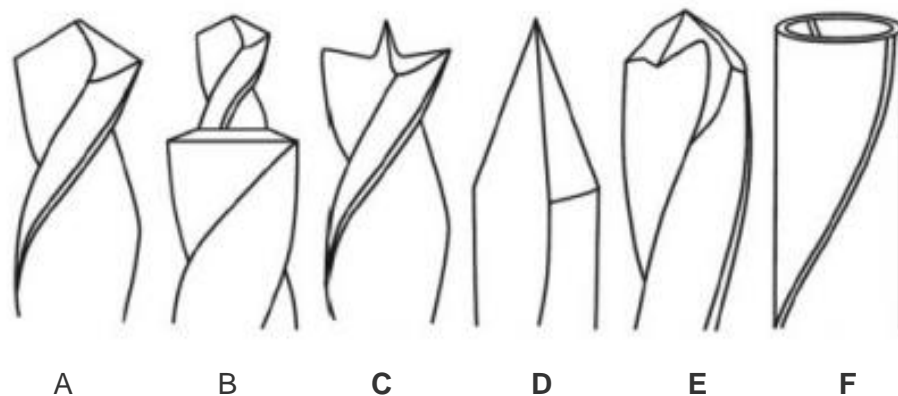
4. Material Removal

Material removal adalah volume material benda kerja yang terlepas per menit, dengan persamaan 4:

$$MRR = V \times f \times D \quad (4)$$

Di mana 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.

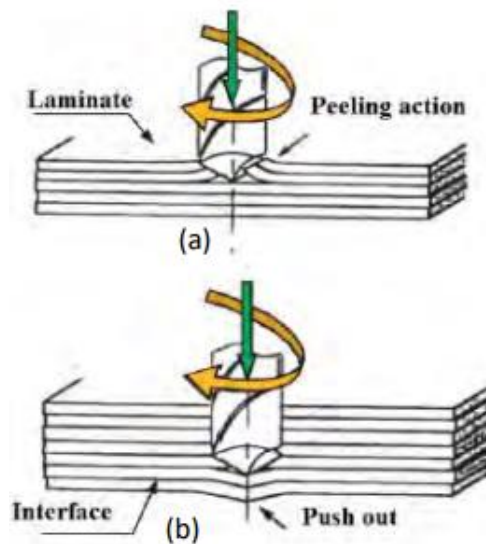


Gambar 9. Skema geometri pahat gurdi khusus yang digunakan untuk penggurdian komposit yang diperkuat serat: (a) *standard twist drill*; (b) *step drill*; (c) *brad and spur (candle stick) drill*; (d) *dagger drill*; (e) *multi-faceted drill*; (f) *core drill*.

Sumber: Schulze, V., Becke, C., Weidenmann, K. and Dietrich, S. (2011). Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards. *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier B.V., 211(3), pp. 329– 338. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.004.

Investigasi yang dilakukan dalam bidang penggurdian komposit polimer menunjukkan bahwa *feed rate*, *spindle speed* dan geometri pahat adalah tiga parameter yang mempengaruhi kualitas lubang, sebagian besar investigasi dilakukan untuk menentukan *feed rate* dan *spindle speed* yang optimal dalam penggurdian komposit, namun belum ada inovasi yang tepat yang dapat digunakan dalam bidang geometri pahat (Debnath *et al.*, 2016). Menurut (Sundaram *et al.*, 2017) kualitas lubang dapat dicapai pada tingkat *feed rate* minimum pada GFRPC dan disaat yang sama tingginya tingkat *feed rate* dapat menghasilkan fraktur pada komposit yang secara alami dipengaruhi oleh diameter gurdi di mana permukaan kontak antara alat dan benda kerja

dapat meningkatkan beban pada mata gurdi sehingga terjadi penyimpangan suhu sehingga menurunkan kualitas lubang.



Gambar 10. Mekanisme delaminasi; (a) *peel-up* pada sisi masuk dan; (b) *Push-out* pada sisi keluar,

Sumber: Kavadi, B. V., Pandey, A. B., Tadavi, M. V and Jakharia, H. C., 2014. A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic, *Procedia Technology*. Elsevier B.V., 14, pp. 457–464. doi: 10.1016/j.protcy.2014.08.058.

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 penggurdian 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 5 sebagai berikut:

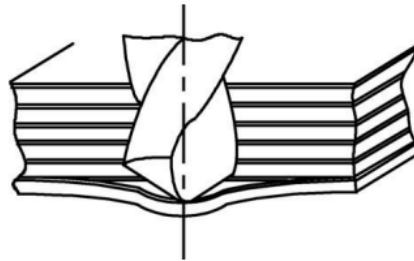
$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (5)$$

Di mana, D_{max} = diameter maksimum zona delaminasi dan D = diameter lubang.

2.5 Model Revisi dalam Prediksi Delaminasi

Para peneliti sebelumnya telah memperkenalkan berbagai model persamaan untuk memprediksi kerusakan delaminasi pada material komposit. 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, (Ho-Cheng dan Dharan, 1990).



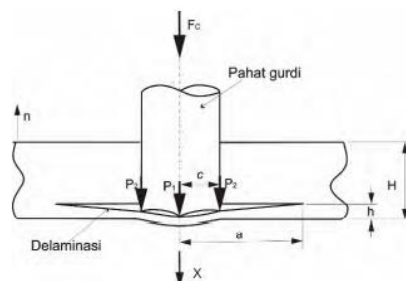
Gambar 11. Skema penggurdian material komposit.

Sumber: Ho-Cheng, H. and Dharan, C. K. H., 1990. Delamination during drilling in composite laminates. *Journal of Engineering for Industry*. ASME, 112(3), pp. 236–239. Available at: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2899580>.

Gambar 11 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:

$$G_{IC} \cdot dA = F_A \cdot dX + dU \quad (6)$$

Di mana dU adalah energi regangan yang sangat kecil, dA peningkatan area retak delaminasi dan G_{IC} adalah energi perambatan retak kritis per unit area dalam mode I. Nilai G_{IC} diasumsikan konstan sebagai fungsi dari laju regangan, (Ho-Cheng dan Dharan, 1990).



Gambar 12. Model *circular plate* untuk analisis delaminasi pada penggurdian dengan pahat “*brad & spurs*”

Sumber: Chandrabakty, S., Renreng.I., Djafar.Z., Arsyad.H. (2019). An optimization of the machining parameters on delamination in drilling ramie woven reinforced composites using Taguchi method. *Journal of Physics: Conference Series* Ser. 1341 052005. doi: 10.1088/1742-6596/1341/5/052005.

Pada penggurdian menggunakan pahat “*brad & spur*” atau biasa juga disebut *candlestick drill*, konsentrasi beban pusat terkait dengan distribusi beban sirkular. Seperti pada Gambar 12, 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* kritis (F_c) dapat diekspresikan sebagai berikut,

$$F_c = P_1 + P_2 \quad (7)$$

Di mana P_1 adalah konsentrasi beban terpusat dan P_2 adalah beban sirkular terdistribusi, seperti pada Gambar 12. Selanjutnya P_2 adalah penjabaran persamaan berikut,

$$P_2 = a.P_1 \quad (8)$$

Konsentrasi beban terpusat P_1 dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$P_1 = \pi \sqrt{\frac{32.G_{IC}.M}{1+a^2(1-2S^2+S^4)}} \quad (9)$$

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

$$M = \frac{E.h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (10)$$

Di mana E adalah *Young's modulus* dan ν adalah *Poisson's ratio* dari material komposit yang diperkuat rami tenun. Nilai S adalah diperoleh dari c/a , sedangkan nilai α adalah rasio beban melingkar dan beban terpusat. Dengan mensubstitusikan persamaan (9) dan (8) ke persamaan (7) akan diperoleh *thrust force* kritis pahat “*brad & spur*” pada awal perambatan retakan.

$$F_c = \pi(1 + a) \sqrt{\frac{32.G_{IC}.M}{1+a^2(1-2S^2+S^4)}} \quad (11)$$

Di mana F_c adalah *thrust force* kritis dan nilai S adalah diperoleh dari c/a , sedangkan nilai α adalah rasio beban melingkar dan beban terpusat. M adalah kekakuan per satuan lebar material komposit yang diperkuat rami tenun. G_{IC} adalah energi perambatan retak kritis per unit area dalam mode I.

2.6 Kekuatan Tarik Sisa (*Residual Tensile Strength*) pada Proses Permesinan 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 makroskopik, 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 pemesinan 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 semakin penting untuk melakukan penelitian dalam penentuan tegangan sisa 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).

2.7 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 *et al.*, (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 *et al.*, 2015). Sebagai suatu konsep, ANOVA dapat didefinisikan bahwa setiap struktur dimensi tinggi dapat dipecah menjadi bagian dari persamaan 6 berikut.

$$f(x) = f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{j=i+1}^n f_{i,j}(x_i, x_j) + f_{1,2,\dots,n}(x) \quad (12)$$

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 7 berikut.

$$SS_T = \sum y_i^2 \quad \text{untuk } i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Persamaan ini juga dapat diperoleh dari persamaan 8 berikut,

$$SS_T = SS_m + SS_e \quad (14)$$

Di mana $SS_m = n \cdot M^2$, 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 ANOVA*), ketika efek interaksi faktor utama mempengaruhi nilai *output*, variasi total dapat didekomposisi menjadi lebih banyak komponen sebagai berikut.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_e \quad (15)$$

Di mana $SS_A = (A1 - A2)$ dan $SS_B = (B1 - B2)$ adalah variasi dari dua faktor A dan B, sedangkan $SS_{AB} = \sum (AB)^2 / n_{ABi}$ 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.

2.8 Metode Taguchi dalam Optimasi Parameter Permesinan

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 eksperimen dan menyederhanakan analisis eksperimental. Metode Taguchi *orthogonal array layout*, mampu memberikan informasi yang lengkap 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-tonoise (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*:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (18)$$

Di mana, \bar{y} adalah rata-rata data yang diobservasi, s^2 adalah variasi dari y , 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*"