



Perkembangan Kualitas Lubang Komposit Serat Daun Nanas dengan Menggurdi Bertahap Kecepatan Tinggi

Whiko Androser Mahdi¹, Ismet Hari Mulyadi^{2*}

¹Program Magister, Departemen Teknik Mesin, Universitas Andalas

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

*ismet@eng.unand.ac.id

Abstract

Composites are materials consisting of reinforcement and matrix. Reinforcing materials of composites consist of synthetic materials and natural fiber materials. One of the natural fibers that is currently being developed is pineapple leaf fiber, where several studies have found several ways to process pineapple leaf fiber so that it can be used as a substitute for synthetic fibers. One of the studies is looking for good machining parameters to process pineapple leaf fiber with a peck drilling canned cycle process which in this research objectives to see how the development of hole quality in the peck drilling canned cycle process. The stage in this research starts from the material being drilled with the stepwise dredging method, after the dredging process the holes are viewed using a digital microscope and then measured using Digimizer image processing software. The results of this study are roundness deviation, cylindricity deviation, axis perpendicularity deviation, and delamination ratio. The results obtained from this study will be subjected to statistical tests in order to obtain tested values using the ANOVA statistical test with the approach used, namely the fisher individual test in order to see the real impact of the machining process carried out.

Keywords: composite, pineapple leaf fiber (PALF), peck drilling canned cycle, digimizer, ANOVA

Abstrak

Komposit adalah material yang terdiri dari penguat dan matriks. Material penguat dari komposit terdiri dari material sintetis dan material serat alam. Salah satu serat alam yang sedang dikembangkan saat ini yaitu serat daun nanas, dimana beberapa penelitian telah mendapatkan beberapa cara dalam memproses serat daun nanas agar dapat digunakan sebagai pengganti serat sintetis. Salah satu penelitian yaitu mencari parameter pemesinan yang baik untuk memproses serat daun nanas dengan proses menggurdi bertahap (*peck drilling canned cycle*) yang mana pada penelitian ini bertujuan untuk melihat bagaimana perkembangan kualitas lubang pada proses menggurdi bertahap. Tahap pada penelitian ini dimulai dari material tersebut digurdi dengan metode menggurdi bertahap, setelah proses penggurdian lubang-lubang tersebut dilihat menggunakan mikroskop digital dan selanjutnya diukur menggunakan perangkat lunak pemrosesan gambar Digimizer. Hasil dari penelitian ini berupa nilai penyimpangan kebulatan (*roundness deviation*), nilai penyimpangan kesilindrisan lubang (*cylindricity deviation*), nilai penyimpangan ketegaklurusan sumbu lubang (*axis perpendicularity deviation*), dan nilai ratio delaminasi lubang (*delamination*). Hasil yang didapat dari penelitian ini akan dilakukan uji statistik guna mendapatkan nilai yang teruji dengan menggunakan uji statistik ANOVA dengan pendekatan yang digunakan yaitu *fisher individual test* agar dapat melihat dampak nyata dari proses pemesinan yang dilakukan.

Kata kunci: komposit, serat daun nanas, menggurdi bertahap, digimizer, ANOVA

1. Pendahuluan

Material komposit terdiri dari penguat (serat, partikel, serpihan, atau pengisi) yang tertanam dalam matriks (polimer, logam, atau keramik). Penguat meningkatkan sifat mekanik matriks secara keseluruhan, sedangkan matriks berfungsi untuk

menahan penguat dalam mempertahankan bentuk yang diinginkan. Material gabungan baru yang dihasilkan akan menunjukkan kekuatan yang lebih besar dari masing-masing material pembentuk jika dirancang dengan benar. Material penguat yang digunakan dalam pembuatan material komposit sangat beragam seperti *glass fibers*, *carbon fibers*, *aramid*

fibers, boron fibers, ceramic fibers dan serat alam. Serat alam diperoleh dari berbagai jenis tumbuhan yang mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin, serta bersumber dari hewan yang mengandung protein tertentu seperti sutera dan bulu domba. Material komposit memiliki berbagai keunggulan dibandingkan dengan logam, akan tetapi masih ada beberapa kelemahan, seperti biaya pembuatan yang tinggi. Tingginya biaya bahan baku, terutama penggunaan serat berkinerja tinggi, serta kurangnya proses manufaktur yang efisien, menjadi penyebab utamanya. Salah satu solusi yang diusulkan untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan penggunaan serat alam yang berasal dari limbah produksi nanas, khususnya limbah daun nanas yang memiliki nilai modulus dan kekuatan tarik yang tinggi.

Serat daun nanas (*Pineapple Leaf Fibre Reinforced-PALF*) yang memiliki kandungan selulosa tipe I yang tinggi dan sudut mikrofibril yang lebih rendah daripada serat selulosa kapas, PALF memberikan kekuatan mekanik yang besar. Dalam kondisi pembebanan regangan tegangan tinggi, serat mentah dapat bertahan. Sifat mekanik, fisik, dan kandungan kimia PALF telah dipelajari oleh banyak peneliti. Modulus mekanik dan sifat kekuatan PALF sebanding dengan serat kaca. Jika dilihat melalui mikroskop optik, PALF adalah serat nabati multiseluler dengan diameter rata-rata 10 μm dan panjang rata-rata 4,5 μm . Diameter serat dasar berkisar antara 25 dan 34 μm [1].

Dalam proses manufaktur kedua untuk mendapatkan kualitas lubang yang baik dalam proses menggurdi dapat menggunakan salah satu metode yaitu *peck drilling canned cycle*, dimana metode ini adalah metode yang dapat digunakan untuk menentukan ukuran setiap *peck* yang menghilangkan lebih sedikit material pada setiap potongan untuk meningkatkan umur pahat, memecahkan kepingan *swarf*, dan membantu mengalirkan cairan pendingin ke dasar lubang pada proses menggurdi. Kerusakan lubang seperti delaminasi, retak matriks dan pecahnya serat yang terjadi selama proses penggurdian dapat mengurangi kekuatan terhadap kelelahan, sehingga dapat mengurangi kinerja laminasi komposit dalam jangka panjang [2].

Kurniawati dan Ma'sum (2023) telah melakukan penelitian dengan menggunakan metode menggurdi bertahap dan membandingkannya dengan proses menggurdi menggunakan pahat potong dengan geometri bertingkat. Hasil penelitian mereka menyimpulkan bahwa metode menggurdi bertahap memberikan kualitas lubang yang lebih baik. Pada penelitian tersebut, parameter yang divariasikan adalah *feed rate*, sedangkan kecepatan spindle dijaga tetap. Metode penggurdian bertahap menghasilkan kualitas lubang yang lebih baik, meskipun dengan perbedaan yang relatif kecil (sekitar 2%) dibandingkan dengan metode pahat potong bertingkat [3].

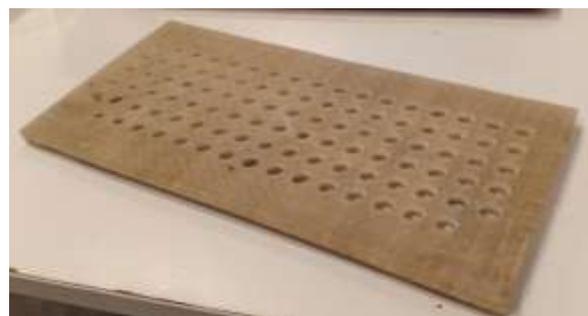
Berdasarkan latar belakang tersebut penulis bermaksud untuk melakukan penelitian dengan menggunakan material komposit serat daun nanas dan melubangi material dengan metode penggurdian bertahap (*peck drilling canned cycle*) dengan parameter pemesinan yang telah ditentukan.

Tujuan dari dilakukan penelitian ini untuk melihat perkembangan dari proses penggurdian berkelanjutan dengan melihat hasil dari lubang-lubang dengan mengukur nilai dari penyimpangan kebulatan (*roundness deviation*), nilai penyimpangan kesilindrisan lubang (*cylindricity deviation*), nilai penyimpangan ketegaklurusan sumbu lubang (*axis perpendicularity deviation*), dan nilai ratio delaminasi lubang (*delamination*). Hasil yang didapat dari penelitian ini akan dilakukan uji statistik guna mendapatkan nilai yang teruji dengan menggunakan uji statistik ANOVA dengan pendekatan yang digunakan yaitu *fisher individual test* agar dapat melihat dampak nyata dari proses pemesinan yang dilakukan [4,5].

2. Metode Penelitian

2.1. Persiapan Material

Spesimen percobaan dibuat menjadi beberapa bentuk pelat komposit dengan dimensi masing-masing 300 mm x 150 mm x 7,5 mm. Spesimen ini dibuat dengan menggunakan resin *epoxy* sebagai matriks yang diperkuat dengan PALF (Serat Daun Nanas) dan ditambahkan aditif sebagai penguat. PALF dipintal dan ditunen menjadi mat dengan orientasi silang 90 derajat dengan ketebalan 2,25 mm. Dengan teknik *hand lay-up*, pelat komposit memiliki komposisi persentase berat matriks dan serat yang ditunen masing-masing sebesar 70% dan 30%. Gambar 1 menunjukkan spesimen eksperimental komposit yang telah dibuat.



Gambar 1. Material Komposit

2.2. Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan metodologi eksperimental dengan pendekatan deterministik, di mana desain percobaan sangat penting untuk menganalisis faktor-faktor secara sistematis. Tujuannya adalah melihat perkembangan dari proses menggurdi dengan metoda menggurdi bertahap dalam menghasilkan lubang secara berkelanjutan, dengan fokus pada parameter kecepatan spindle dan *feed rate*. *Feed rate*

yang digunakan adalah 0,1, 0,3, dan 0,6 mm/r, sementara kecepatan spindel ditetapkan pada 3200 rpm. Dengan kecepatan spindel yang tinggi diharapkan dapat mengurangi keausan pahat, yang berdampak positif pada kualitas lubang dan mengurangi delaminasi.

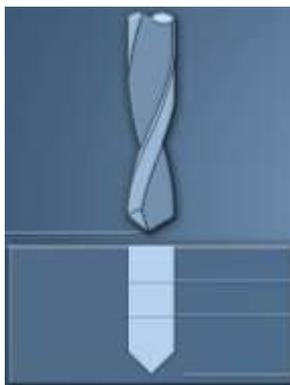
Dalam pengambilan data, seluruh percobaan dilakukan pengulangan sebanyak 2 (dua) kali. Untuk hasil pemilihan parameter dan respon yang diamati dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Pemesinan dan Respon

No	1	2	3	4	5	6	
Kecepatan Spindel (rpm)	3200						
Parameter	Feed rate (mm/r)						
	0,1	0,1	0,3	0,3	0,6	0,6	
Respon	Kualitas Lubang	Kebulatan	Atas				
			Bawah				
		Kesilindrisan					
		Keteg-alurusa					
		Delaminasi	Atas				
			Bawah				

2.3. Persiapan Eksperimen

Prosedur proses pengurdian material komposit bertujuan untuk membuat lubang tembus. Metode pengurdian bertahap dilakukan dengan menggunakan kode G83, dengan menggunakan pahat gurdi bentuk *twist* dengan jenis HSS berukuran 11 mm. Proses pengurdian dilakukan dengan bantuan mesin CNC *Feeler* model VMP-40A, yang dapat beroperasi pada kecepatan spindel maksimum 3200 RPM dan *feed rate* 2 m/menit. Semua lubang yang diamati diperiksa menggunakan mikroskop digital dengan pembesaran maksimum 500x. Gambar hasil dari mikroskop digital selanjutnya dilakukan pengukuran untuk melihat kualitas lubang yang dihasilkan dengan bantuan perangkat lunak pemrosesan gambar *Digimizer* versi percobaan. Selanjutnya, semua data yang dikumpulkan dianalisis menggunakan *One-way Analysis of Variance* (ANOVA) dengan tingkat kepercayaan 95%, pendekatan *Fisher Individual Test*.



Gambar 2. Metode menggurdi bertahap kode G83

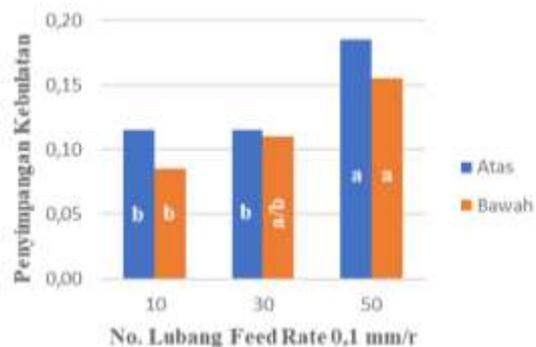


Gambar 3. Pahat gurdi HSS 11 mm

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Penyimpangan Kebulatan Lubang

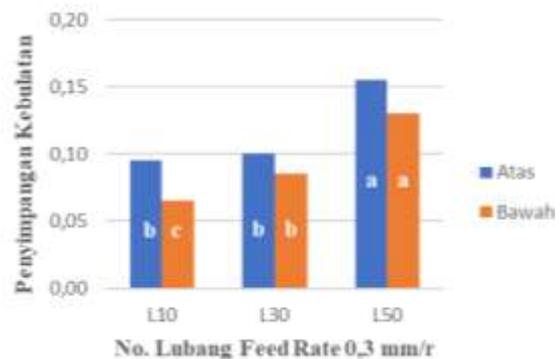
Penyimpangan lubang pada material komposit, terutama yang berpenguat serat perlu diperhatikan karena memengaruhi kualitas permukaan serta dapat menyebabkan masalah mekanika termal, delaminasi, dan retak mikro. Kualitas dari lubang harus diamati untuk melihat perkebangan dari proses pemesinan yang dilakukan berdasarkan *feed rate* yang digunakan. Berikut adalah hasil dari penyimpangan kebulatan lubang dengan *feed rate* 0,1 mm/r.



Gambar 4. Penyimpangan Kebulatan *Feed Rate* 0,1 mm/r. Nilai a dan b menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 4, penyimpangan kebulatan tidak terlalu berdampak pada lubang 10 dan 30, akan tetapi perbedaan terlihat pada nilai penyimpangan kebulatan pada lubang 50. Hasil dari uji statistik ANOVA juga membedakan pengelompokan lubang 50 dengan lubang 30 dan 10, Dimana ini menandakan adanya perubahan nilai yang signifikan yang disebabkan oleh meningkatnya nilai keausan dari pahat yang menyebabkan kualitas lubang semakin menurun.

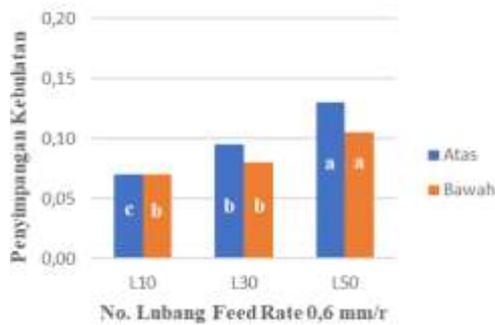
Berikut adalah hasil dari penyimpangan kebulatan lubang dengan *feed rate* 0,3 mm/r.



Gambar 5. Penyimpangan Kebulatan *Feed Rate* 0,3 mm/r. Nilai a, b, dan c menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 5 dapat dilihat nilai penyimpangan kebulatan *feed rate* 0,3 mm/r tertinggi lebih rendah dibandingkan dengan nilai penyimpangan pada *feed rate* 0,1 mm/r. Hasil ini juga di uji statistik ANOVA yang mana perubahan signifikan terjadi pada lubang 50, akan tetapi terjadi perbedaan pada pengelompokan lubang bagian bawah dimana terdapat tiga kelompok data. Hal ini terjadi bisa disebabkan oleh penetrasi dari pahat yang tinggi sehingga gerak pahat turun tidak saja memotong tetapi juga menekan material yang menyebabkan material melengkung sehingga mempengaruhi dari kualitas lubang.

Berikut adalah hasil dari penyimpangan kebulatan lubang dengan *feed rate* 0,6 mm/r.



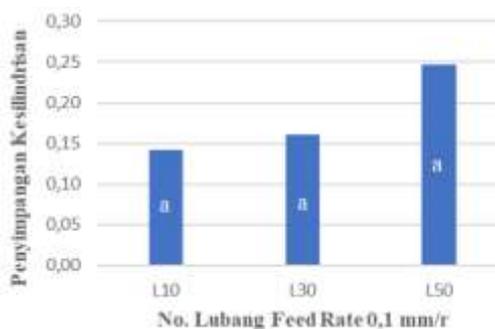
Gambar 6. Penyimpangan Kebulatan *Feed Rate* 0,6 mm/r. Nilai a, b, dan c menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Gambar 6 dapat dilihat bahwa semakin besarnya gerak makan, maka berkombinasi dengan kecepatan potong yang ditingkatkan akan dapat meningkatkan kecepatan makan ($Feedrates-V_f$) dari pahat saat memotong. Dengan peningkatan kecepatan makan maka kontak pahat dengan benda kerja akan lebih baik yang dapat menjaga konsistensi proses pemotongan.

3.2. Penyimpangan Kesilindrisan Lubang

Penyimpangan kesilindrisan lubang salah satu hal yang harus diamati untuk mendapatkan kualitas lubang yang lebih baik.

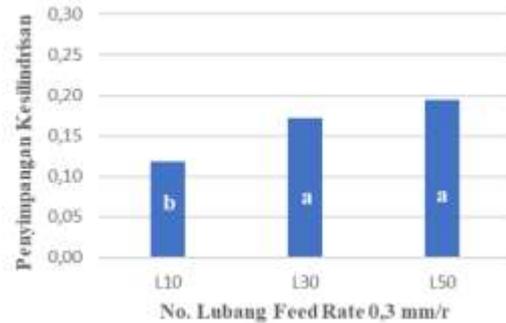
Berikut adalah hasil dari penyimpangan kesilindrisan lubang dengan *feed rate* 0,1 mm/r.



Gambar 7. Penyimpangan Kesilindrisan *Feed Rate* 0,1 mm/r. Nilai a menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 7 dapat dilihat nilai penyimpangan kesilindrisan tertinggi pada lubang 50, akan tetapi berdasarkan hasil uji statistik ANOVA mengelompokkan ketiga data berada pada kelompok yang sama dimana dari ketiga data tidak ada perubahan yang signifikan.

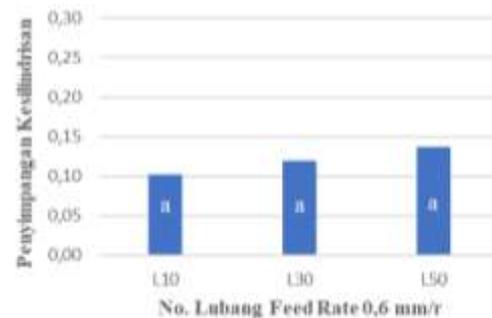
Berikut adalah hasil dari penyimpangan kesilindrisan lubang dengan *feed rate* 0,3 mm/r.



Gambar 8. Penyimpangan Kesilindrisan *Feed Rate* 0,3 mm/r. Nilai a dan b menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 8 dapat dilihat adanya dua kelompok data berdasarkan uji statistik ANOVA. Hal ini menjelaskan bahwa adanya perbedaan yang signifikan pada lubang 10 dengan lubang 30 dan 50.

Berikut adalah hasil dari penyimpangan kebulatan lubang dengan *feed rate* 0,6 mm/r.



Gambar 9 Penyimpangan Kesilindrisan *Feed Rate* 0,1 mm/r. Nilai a menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

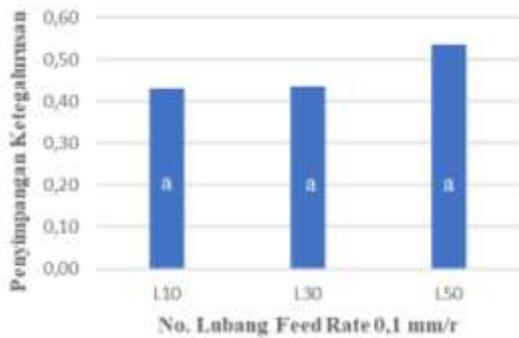
Pada Gambar 9 pada *feed rate* 0,6 mm/r hasil dari penyimpangan kesilindrisan memiliki kelompok yang sama dimana lubang 10 sampai lubang 50 belum terjadi perbedaan yang signifikan. kecepatan potong yang tinggi maka akan meningkatkan kecepatan makan. Dengan semakin meningkatnya kecepatan makan maka penyimpangan kesilindrisan lubang akan semakin berkurang. Hal ini dapat terjadi disebabkan kecepatan makan yang tinggi membuat proses pemotongan lebih efisien [6,7], tingkat defleksi pahat yang rendah [8,9].

3.3. Penyimpangan Ketegaklurusan Sumbu Lubang

Ketegaklurusan sumbu sebuah lubang merupakan hal yang penting untuk menghasilkan lubang yang

berkualitas, integritas struktural, kinerja mekanika dan pengendalian kualitas toleransi sehingga kehandalan dan fungsi dari sebuah komponen yang terbuat dari komposit dapat terjaga [10,11].

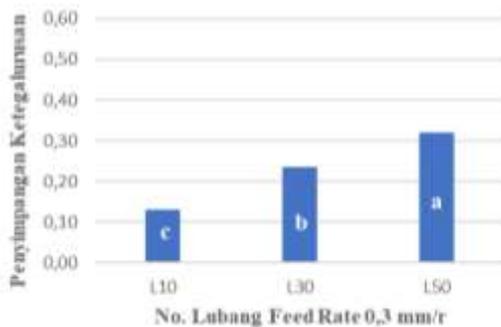
Berikut adalah hasil dari penyimpangan ketegaklurusan sumbu lubang dengan *feed rate* 0,1 mm/r.



Gambar 10. Penyimpangan Ketegaklurusan Sumbu Lubang Feed Rate 0,1 mm/r. Nilai a menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Gambar 10 melihat bahwa nilai penyimpangan ketegaklurusan sumbu lubang pada *feed rate* 0,1 mm/r lebih besar dibandingkan dengan *feed rate* 0,3 mm/r dan 0,6 mm/r. Pada lubang 10, 30, dan 50 selisih nilai penyimpangan tidak terjadi perbedaan yang signifikan dimana ketiga data berada pada kelompok yang sama berdasarkan uji statistik ANOVA.

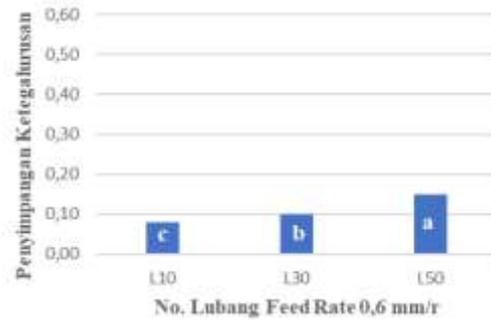
Berikut adalah hasil dari penyimpangan ketegaklurusan sumbu lubang dengan *feed rate* 0,3 mm/r.



Gambar 11. Penyimpangan Ketegaklurusan Sumbu Lubang Feed Rate 0,3 mm/r. Nilai a, b, dan c menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Dalam proses penggurdian dengan *feed rate* 0,3 mm/r, nilai penyimpangan lebih rendah dibandingkan dengan *feed rate* 0,1 mm/r akan tetapi ketiga data memiliki kelompok yang berbeda berdasarkan uji statistik ANOVA. Hal ini menunjukkan bahwa adanya perbedaan yang signifikan antara lubang 10, 30, dan 50.

Berikut adalah hasil dari penyimpangan ketegaklurusan sumbu lubang dengan *feed rate* 0,6 mm/r.



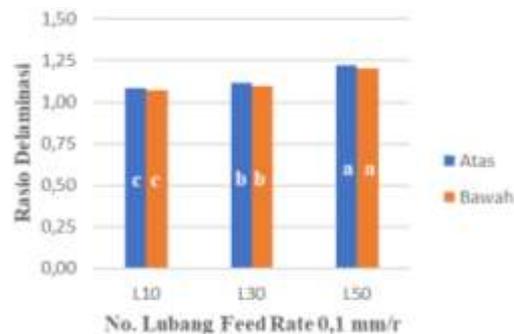
Gambar 12. Penyimpangan Ketegaklurusan Sumbu Lubang Feed Rate 0,6 mm/r. Nilai a, b, dan c menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 12 dapat dilihat bahwa semakin tinggi gerak makan maka penyimpangan ketegaklurusan sumbu lubang akan semakin kecil. Hal ini disebabkan karena kombinasi gerak makan dengan kecepatan potong yang tinggi akan menyebabkan peningkatan kecepatan makan pada saat pahat melakukan proses melubang. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Sheth dan George (2016) [12]. Kondisi ini terjadi karena pada kecepatan makan tinggi stabilitas pahat akan lebih baik, proses pemotongan lebih konsisten, pembuangan geram lebih baik dan pengaruh panas yang lebih rendah [13,14,15].

3.4 Nilai Rasio Delaminasi Lubang

Delaminasi menjadi salah satu masalah yang dapat terjadi pada saat proses menggurdi, dimana proses terbentuknya delaminasi secara dominan diakibatkan oleh gaya tekan dan keausan pahat. Delaminasi terjadi pada saat awal menggurdi material komposit yang mempengaruhi kualitas lubang bagian atas dan juga terjadi pada saat akhir proses menggurdi yang mempengaruhi kualitas dari lubang bagian bawah.

Berikut adalah hasil dari nilai rasio delaminasi dengan *feed rate* 0,1 mm/r.

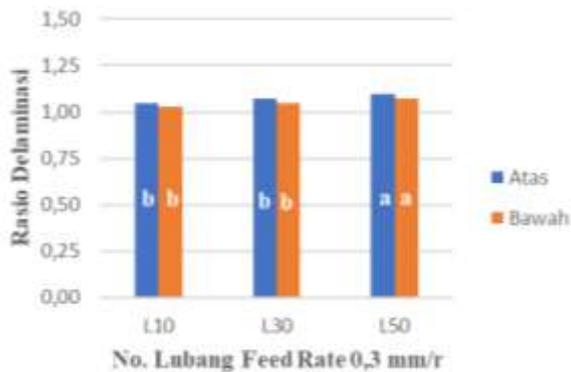


Gambar 13. Nilai Rasio Delaminasi Feed Rate 0,1 mm/r. Nilai a, b, dan c menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 13 dapat dilihat nilai rasio delaminasi antara lubang atas dengan lubang bawah memiliki kelompok yang sama pada masing masing lubang 10, 30, dan 50. Selanjutnya antara lubang 10, 30, dan 50 terdapat perbedaan kelompok yang mana terdapatnya perbedaan yang signifikan pada masing-masing

lubang walapun selisih nilai rasio delaminasinya relatif kecil.

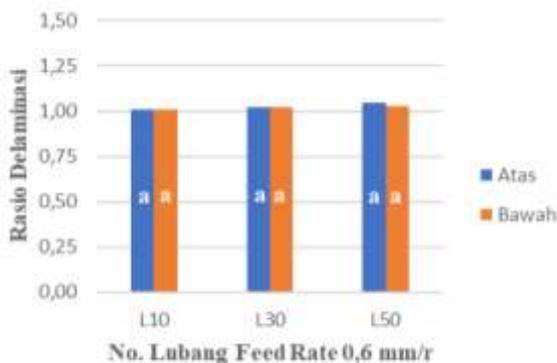
Berikut adalah hasil dari nilai rasio delaminasi dengan *feed rate* 0,3 mm/r.



Gambar 14. Nilai Rasio Delaminasi *Feed Rate* 0,3 mm/r. Nilai a dan b menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 14 data terbagi menjadi dua kelompok dimana lubang 10 dan 30 memiliki kelompok yang sama. Hal ini menjelaskan bahwa perbedaan yang signifikan pada saat proses menggurdi lubang terjadi pada lubang 50, walapun selisih nilai rasio delaminasinya kecil tetapi sudah terjadi perbedaan kelompok berdasarkan uji statistik ANOVA.

Berikut adalah hasil dari nilai rasio delaminasi dengan *feed rate* 0,6 mm/r.



Gambar 15. Nilai Rasio Delaminasi *Feed Rate* 0,6 mm/r. Nilai a menandakan pengelompokan data dari uji statistik ANOVA

Pada Gambar 15, dengan meningkatkan kecepatan potong yang dikombinasikan dengan gerak makan yang besar maka kerusakan lubang disebabkan delaminasi dapat diturunkan. Hal ini terbukti dari selisih nilai rasio delaminasi masing-masing lubang kecil. Berdasarkan uji statistik ANOVA yang mengelompokkan ketiga data dalam kelompok yang sama membuktikan bahwa tidak terjadinya perubahan yang signifikan. Kondisi pemesinan ini baik digunakan untuk proses penggurdian dengan jumlah lubang yang banyak dikarenakan perbedaan yang signifikan belum terlihat sampai menggurdi lubang ke 50.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian menggurdi material komposit berpenguat serat daun nanas dengan metoda menggurdi bertahap (*peck drilling canned cycle*) dengan tiga varian gerak makan memiliki perbedaan terhadap kualitas lubang pada masing-masing gerak makan. Pada saat menggurdi dengan gerak makan yang rendah penyimpangan kualitas lubang lebih tinggi dibandingkan dengan menggurdi dengan gerak makan yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan gerak makan yang tinggi dalam menggurdi dapat meningkatkan kualitas lubang, akan tetapi dalam menggurdi secara berkelanjutan, penggunaan gerak makan yang besar memberikan perbedaan yang signifikan selama proses menggurdi berkelanjutan. Hal ini dapat dilihat pada hasil pengelompokan data yang telah diuji dengan uji statistik ANOVA dengan *confidential factor*-CF 95%. Dengan adanya perbedaan kelompok pada masing-masing lubang yang diuji menjelaskan bahwa adanya perbedaan yang signifikan yang terjadi. Hal ini dapat disebabkan oleh kemampuan pahat yang menurun akibat adanya perubahan termal saat pahat menggurdi material komposit.

Ucapan Terimakasih

Penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas yang telah mengizinkan memanfaatkan semua fasilitas yang diperlukan untuk menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Rujukan

- [1] N. Kengkhetkit and T. Amornsakchai., 2012. Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber. *Ind Crops Prod*, 40 (1), pp.55–61.
- [2] L. Li, L. F. Xavier, P. Suresh, R. Balaragavenderan, P. Y. Kumar, and S. Deepak., 2016. Studies on the influence of drilling cycle on the surface roughness of the drilled holes. 11 (2), pp.6538345.
- [3] Gcodetutor, "G73 and G83 drilling cycles." Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: <https://gcodetutor.com/fanuc-training-course/g73-g83-drilling-cycle.html>
- [4] L. Kurniawati, 2023. Perbandingan menggurdi bertahap dengan pahat geometri bertingkat terhadap kualitas lubang pada proses menggurdi material komposit berpenguat serat nanas, Thesis, Universitas Andalas, Padang.
- [5] A. Ma'sum, 2023. Perbandingan metoda menggurdi bertahap dengan metoda geometri pahat bertingkat terhadap delaminasi lubang pada proses menggurdi material komposit berpenguat serat nanas, Thesis, Universitas Andalas, Padang.
- [6] U. Prisco, F. Impero, and F. Rubino., 2019. Peck drilling of CFRP/titanium stacks: effect of tool wear on hole dimensional and geometrical accuracy. *Production Engineering*, 13 (5), pp.529–538.
- [7] A. Kentli., 2011. Experimental study on peck drilling of GFRP and prediction of drilling-induced damage using

- ANN. *Scientific Research and Essays*, 6 (7), pp.1546–1554.
- [8] Z. Zhu, K. Liu, J. Sun, and J. Li., 2019. Investigation on performance characteristics and metallographic transformation on drilling aluminium/titanium sandwich. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 21 (4), pp.1578–1594.
- [9] J. Salguero, S. R. Fernandez-Vidal, P. Mayuet, J. M. Vazquez-Martinez, M. Alvarez, and M. Marcos., 2016. Methodology for the Study of the Quality of CFRP Dry Drilling Based on Macrogeometrical and Dimensional Deviations. *World Journal of Engineering and Technology*, 4 (3), pp.200–205.
- [10] G. B. Mihoc², A. Pop¹, H. Geaman², D. Cazangiu², and L. Mitu²., 2011. A Review Of The Drilling Processes Of Composite Materials. *Annals Of The Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering*, 20 (10), pp.1-5.
- [11] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, J. F. S. Marques, and O. N. G. Andrade., 2014. Drilling damage in composite material. *Materials*, 7 (5), pp.3802–3819.
- [12] S. Sheth and P. M. George., Experimental investigation, prediction and optimization of cylindricity and perpendicularity during drilling of WCB material using grey relational analysis. *Precis Eng*, 45 pp.33–43.
- [13] P. Ramiro-Castro, M. Ortiz, A. Alberdi, and A. Lamikiz., 2020. Effects of gravity and non-perpendicularity during powder-fed directed energy deposition of ni-based alloy 718 through two types of coaxial nozzle. *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 5, May 2020, doi: 10.3390/met10050560.
- [14] Q. J. Q. Z. C. W. T. W. L. W. Sun J., 2023. Effects of hole perpendicularity error on fatigue behaviors of CFRP single-lap single-bolt joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, pp. 830–840.
- [15] U. Şeker, A. Kurt, and I. Çiftçi., 2003. The effect of feed rate on the cutting forces when machining with linear motion. *J Mater Process Technol*, 146 (3), pp.403–407.