



Analisa Gaya Tekan dan Delaminasi pada Penggurdian KFRP Komposit

Mohammad Muslimin Ilham^{1*}, Am. Mufarrih¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Nusantara PGRI Kediri

*Email Penulis: im.muslimin@yahoo.co.id

INFORMASI ARTIKEL

Naskah Diterima 31/07/2018
Naskah Direvisi 06/08/2018
Naskah Disetujui 29/09/2018
Naskah Online 17/10/2018

ABSTRAK

Penggurdian merupakan proses pemesinan yang terpenting di bidang industri otomotif dan manufaktur. Kinerja dari penggurdian pada material KFRP komposit bisa diukur dengan karakteristik kualitas seperti kekasaran permukaan, *burr height*, kebulatan, konsumsi daya, gaya tekan dan delaminasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi variabel proses penggurdian terhadap respon gaya tekan dan delaminasi. Rancangan percobaan menggunakan metode faktorial yang berupa *orthogonal array* L_9 dengan replikasi sebanyak tiga kali. Variabel proses penggurdian yang divariasikan adalah sudut ujung pahat (100° , 118° , 140°) dan kecepatan makan (50 mm/menit, 115 mm/menit dan 180 mm/menit). Variabel respon yang diamati adalah gaya tekan dan delaminasi. Pahat yang digunakan adalah *twist drill HSS Nachi*. ANOVA digunakan untuk mengetahui variabel-variabel proses yang memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel respon yang diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut ujung pahat dan kecepatan makan berpengaruh signifikan terhadap respon gaya tekan dan delaminasi. Peningkatan sudut ujung pahat akan meningkatkan gaya tekan dan delaminasi. Begitu pula peningkatan kecepatan makan juga akan meningkatkan gaya tekan dan delaminasi.

Kata kunci: *Penggurdian, gaya tekan, delaminasi, KFRP Komposit*

1. PENDAHULUAN

Pengurdian termasuk salah satu proses pemesinan yang bertujuan untuk membuat lubang yang berbentuk silindris pada benda kerja. Hasil pengurdian berguna untuk perakitan antara suatu komponen mesin dengan komponen mesin yang lainnya. Pengurdian merupakan proses pemesinan yang terpenting di bidang industri manufaktur. Bahkan realitanya, biaya pembuatan lubang baik dengan proses pengurdian maupun dengan proses yang lainnya merupakan biaya pemesinan paling besar dalam industri manufaktur dan otomotif [1].

Komponen yang banyak digunakan di industri manufaktur serta banyak dilubangi untuk proses perakitan salah satunya adalah komponen yang berasal dari bahan komposit. Material komposit menjadi pilihan utama karena mempunyai karakteristik kualitas unik yang tidak dimiliki oleh jenis material konvensional lainnya [2].

Aramid fiber reinforced polymer (AFRP) atau juga sering disebut *Kevlar fiber reinforced polymer* (KFRP) adalah salah satu jenis komposit yang memiliki sifat-sifat sebagai berikut [3]: kekerasan yang tinggi, gaya tarik yang tinggi, kepadatan yang rendah, tahan terhadap bahan kimia, tahan panas, struktur yang kuat dan ringan bahkan lima kali lebih kuat dibandingkan besi serta tahan terhadap korosi. KFRP biasanya digunakan di industri otomotif, industri manufaktur, industri tangki, pesawat terbang, peralatan militer dan pesawat antariksa.

Kinerja dari proses pengurdian pada material komposit dapat diukur berdasarkan beberapa karakteristik kualitas seperti gaya tekan, kekasaran permukaan, delaminasi, keausan tepi pahat dan *burr height* [4]. Pada pengurdian material komposit terdapat beberapa masalah yang timbul, diantaranya adalah *fiber pullout*, *matrix cratering*, *thermal damage* dan delaminasi. Kesalahan pemilihan variabel proses pemesinan merupakan penyebab dari timbulnya masalah tersebut [5]. Dari beberapa masalah pada pengurdian material komposit, delaminasi menjadi masalah utama yang paling sering timbul. Delaminasi yang timbul pada sisi masuk (*peel-up*) dan sisi keluar (*push-out*) akan mempengaruhi kualitas lubang hasil pengurdian. Penyebab timbulnya delaminasi pada lubang hasil pengurdian adalah anisotropi dan heterogenitas material komposit yang tersusun dari fasa penguat yang bersifat keras dan matriks yang bersifat lunak [6]. Pada saat proses pengurdian dilakukan kedua fasa penyusun tersebut memiliki perilaku yang berbeda dibandingkan dengan sifat masing-masing material saat terpisah satu sama lain [7]. Penyebab lain dari delaminasi, selain karakteristik material adalah geometri pahat dan variabel proses pemesinan yang digunakan [8]. Oleh karena itu, delaminasi menjadi faktor yang sangat penting untuk diminimalkan guna menghasilkan kualitas lubang yang baik.

Penelitian yang membahas tentang optimasi gaya tekan, delaminasi dan kekasaran permukaan telah dilakukan pada proses pengurdian dengan

menggunakan metode *Taguchi* dan *desirability function* [9]. Variabel proses yang divariasikan adalah ketebalan material, kecepatan spindle, diameter pahat dan gerak makan. Benda kerja dan pahat yang digunakan adalah GFRP NEMA G11 dan *tungsten carbide* yang dilapisi titanium. Rancangan percobaan yang digunakan adalah *orthogonal array* L_{27} dan *desirability function* sebagai metode lanjutan untuk optimasi multirespon. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa kondisi optimal untuk respon gaya tekan, delaminasi dan kekasaran permukaan secara serentak dapat diperoleh pada material setebal 8 mm, kecepatan spindle sebesar 1200 rpm, diameter pahat gundi sebesar 8 mm dan gerak makan sebesar 75 mm/min.

Studi tentang optimasi pada proses gundi dengan bahan *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) juga pernah dilakukan oleh Khrisnamoorthy dkk. [10]. Variabel proses yang divariasikan adalah sudut ujung pahat (100° , 118° , 135°), kecepatan spindle (1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm) dan gerak makan (100 mm/menit, 300 mm/menit, 500 mm/menit). Respon yang dioptimasi adalah gaya tekan, torsi, delaminasi sisi masuk, delaminasi sisi keluar dan kesilindrisan. Rancangan percobaan menggunakan matriks *orthogonal* L_{27} dan metode *Taguchi grey fuzzy* digunakan sebagai metode optimasi multi respon. Pahat yang digunakan adalah *twist drill HSS* berdiameter 6 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk respon gaya tekan, torsi, delaminasi sisi masuk, delaminasi sisi keluar dan kesilindrisan lubang secara serentak dapat dicapai pada sudut ujung pahat sebesar 100° , kecepatan spindle sebesar 3000 rpm dan gerak makan sebesar 100 mm/menit. Variabel proses yang mempunyai persentase kontribusi paling besar terhadap total variasi dari respon yang diamati secara serentak berturut-turut adalah gerak makan memiliki kontribusi sebesar 42,19%, kecepatan spindle memiliki kontribusi sebesar 19,05% dan sudut ujung pahat memiliki kontribusi sebesar 14,18% terhadap total variasi dari respon.

Penelitian ini menggunakan KFRP komposit sebagai spesimen uji dan mengamati pengaruh variabel proses pengurdian terhadap respon gaya tekan dan delaminasi. Variabel proses yang diamati adalah sudut ujung pahat dan kecepatan makan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Rancangan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimental. Penelitian eksperimental bertujuan untuk mengungkapkan hubungan sebab akibat antar variabel dengan memanipulasi variabel prosesnya. Pengaturan variabel proses pada mesin gundi dirujuk dari penelitian-penelitian sebelumnya.

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan mesin frais CNC YCM MV 86A. Pahat yang digunakan adalah *Twist drill HSS Nachi* berdiameter 10 mm.

KFRP komposit dengan dimensi 200 mm x 30 mm x 3 mm digunakan sebagai material benda kerja. Matrik material adalah *epoxy resin*, sedangkan fiber yang digunakan adalah *Kevlar/aramid*. Material KFRP komposit ini merupakan hasil produksi dari PT. Dirgantara Indonesia. KFRP Komposit memiliki *tensile strength* sebesar 515 MPa, *tensile modulus* sebesar 25 GPa, *density* sebesar 1.35 g/cm³ dan *shear modulus* sebesar 8.45 GPa [11]. Penggurdian material terdiri dari dua buah KFRP komposit yang ditumpuk bersamaan. Sehingga tebal dari komposit yang ditumpuk adalah sebesar 6 mm. Proses penggurdian KFRP komposit dilakukan dalam kondisi pemesinan kering tanpa menggunakan cairan pendingin. Proses penggurdian KFRP komposit dapat dilihat pada Gambar 1.

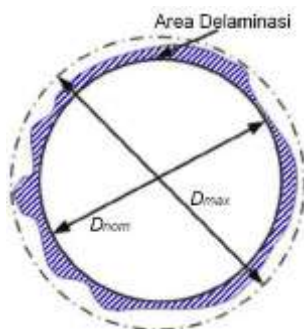


Gambar 1. Penggurdian KFRP Komposit

Nilai gaya tekan pada saat proses penggurdian diukur menggunakan dinamometer merek Kistler tipe 9272. Pengukuran delaminasi dilakukan dengan cara pengambilan gambar lubang hasil penggurdian pada keempat permukaan benda kerja dengan menggunakan *scanner*. Setelah dilakukan pengambilan gambar lubang, kemudian dilakukan pengukuran diameter maksimum pada area delaminasi yang diamati dan diameter lubang nominal dengan menggunakan bantuan perangkat lunak AutoCAD. Setelah itu dilakukan perhitungan faktor delaminasi dengan menggunakan persamaan 1. [12].

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (1)$$

D_{max} merupakan diameter maksimum pada delaminasi yang diamati dan D_{nom} merupakan diameter lubang nominal seperti ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Pengukuran Delaminasi

Variabel proses yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sudut ujung pahat (*point angle*) dan kecepatan makan (*feeding speed*). Masing-masing variabel proses memiliki tiga level seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Sudut ujung pahat dibentuk dengan menggunakan alat *drill resharpening grinder* sesuai dengan level variabel proses yang telah ditentukan sebelumnya.

Tabel 1. Variabel proses dan level

Satuan	Variabel Proses	
	Sudut ujung pahat (PA) (°)	Kecepatan makan (V _f) (mm/min)
Level 1	110	50
Level 2	118	115
Level 3	140	180

2.2 Rancangan Percobaan

Pengaturan variabel proses pada mesin gurdi dirujuk dari penelitian-penelitian sebelumnya. Pengaturan variabel proses yang digunakan pada eksperimen ini menggunakan metode *full factorial* yang berupa *orthogonal array* L₉ seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Pengaturan variabel proses dilakukan seperti rancangan percobaan dengan replikasi sebanyak tiga kali.

Tabel 2. Rancangan percobaan

Percobaan No	Variabel Proses	
	PA (°)	V _f (mm/min)
1	100	50
2	100	115
3	100	180
4	118	50
5	118	115
6	118	180
7	140	50
8	140	115
9	140	180

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian gaya tekan dan delaminasi pada penggurdian KFRP komposit untuk replikasi pertama dapat dilihat pada Tabel 3, replikasi kedua dapat dilihat pada Tabel 4 dan replikasi ketiga dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 3. Hasil Penelitian Gaya tekan dan delaminasi untuk replikasi pertama

No	Variabel Proses		Variabel Respon	
	PA (°)	V _f (mm/min)	Gaya tekan (N)	Delaminasi
1	100	50	41,13	1,038
2	100	50	77,67	1,064
3	100	50	158,45	1,300
4	118	115	85,31	1,200
5	118	115	89,76	1,300
6	118	115	140,54	1,350
7	140	180	94,66	1,130
8	140	180	178,42	1,300
9	140	180	223,56	1,460

Tabel 4. Hasil Penelitian Gaya tekan dan delaminasi untuk replikasi kedua

No	Variabel Proses		Variabel Respon	
	PA (°)	Vf (mm/min)	Gaya tekan (N)	Delaminasi
1	100	50	41,98	1,048
2	100	50	79,23	1,060
3	100	50	155,87	1,250
4	118	115	85,78	1,250
5	118	115	91,88	1,190
6	118	115	139,75	1,350
7	140	180	93,65	1,250
8	140	180	176,36	1,420
9	140	180	222,44	1,480

Tabel 5. Hasil Penelitian Gaya tekan dan delaminasi untuk replikasi ketiga

No	Variabel Proses		Variabel Respon	
	PA (°)	Vf (mm/min)	Gaya tekan (N)	Delaminasi
1	100	50	42,17	1,040
2	100	50	77,82	1,068
3	100	50	154,28	1,332
4	118	115	87,36	1,252
5	118	115	90,73	1,185
6	118	115	137,61	1,448
7	140	180	92,79	1,360
8	140	180	177,72	1,431
9	140	180	217,60	1,455

3.1 Analisis Variabel Proses terhadap Gaya tekan dan delaminasi

Untuk mengetahui apakah sudut ujung pahat dan kecepatan makan mempunyai pengaruh terhadap nilai gaya tekan dan delaminasi pada pengurdian material KFRP komposit dilakukan *Analysis of variance* (ANOVA).

ANOVA mensyaratkan bahwa *residual* harus memenuhi tiga asumsi, yaitu bersifat identik, independen dan berdistribusi normal.

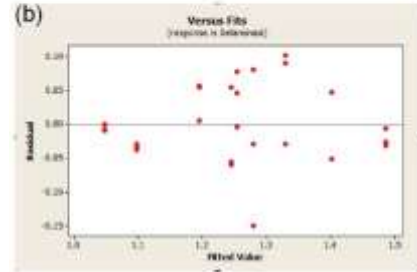
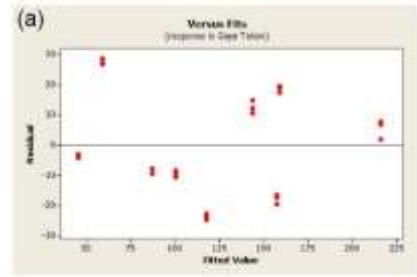
3.1.1 Uji Identik

Uji identik terpenuhi bila *residual* tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Hasil uji identik disajikan pada Gambar 3a dan 3b.

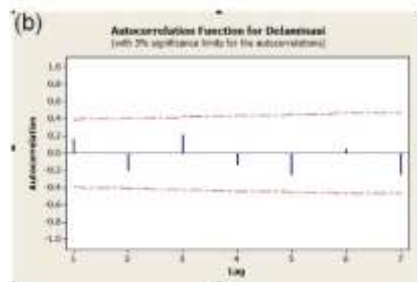
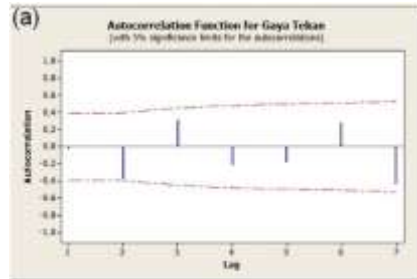
Uji identik pada Gambar 2 menampilkan *residual* tersebar secara acak disekitar harga nol dan tidak membentuk pola tertentu. Hal ini menunjukkan asumsi identik terpenuhi.

3.1.2 Uji Independen

Pengujian independen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *auto correlation function* (ACF). Berdasarkan plot ACF yang ditunjukkan pada Gambar 4a dan 4b. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa tidak ada nilai ACF pada tiap lag yang keluar dari batas interval. Hal ini membuktikan bahwa tidak ada korelasi antar *residual* yang berarti *residual* bersifat independen.



Gambar 3a) Uji identik respon gaya tekan 3b) Uji identik respon delaminasi

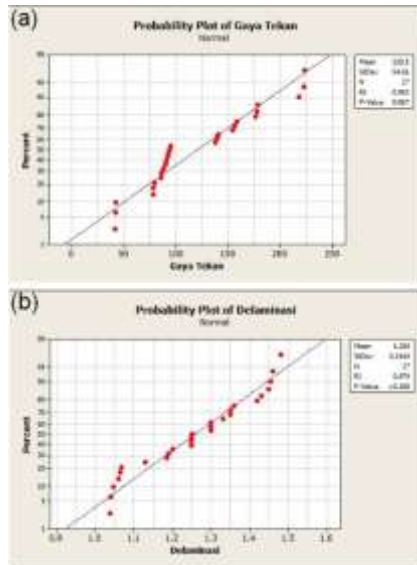


Gambar 4a) Uji independen respon gaya tekan 4b) Uji independen respon delaminasi

3.1.3 Uji Kenormalan

Uji kenormalan *residual* dilakukan dengan menggunakan uji *Ryan-Joiner*. *Residual* berdistribusi normal jika *p-value* lebih besar dari taraf signifikan $\alpha=0,05$. Uji kenormalan dapat dilihat seperti Gambar 5a dan 5b.

Dari Gambar 5a dan 5b dapat dilihat bahwa *p-value* untuk respon gaya tekan sebesar 0,067 lebih besar dari taraf signifikan $\alpha=0,05$, ini berarti *residual* respon gaya tekan berdistribusi normal. Sedangkan *p-value* untuk respon delaminasi sebesar 0,100 lebih besar dari taraf signifikan $\alpha=0,05$, ini berarti *residual* respon delaminasi berdistribusi normal.



Gambar 5a) Uji Kenormalan respon gaya tekan 5b) Uji kenormalan respon delaminasi

3.2 Analysis of Variance (ANOVA)

Setelah uji identik, independen dan distribusi normal terpenuhi, maka dapat dilakukan *analysis of variance* untuk mengetahui variabel proses mana yang memiliki pengaruh secara signifikan terhadap respon gaya tekan dan delaminasi. ANOVA untuk respon gaya tekan ditunjukkan pada Tabel 6. Sedangkan ANOVA untuk respon delaminasi ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 6. ANOVA Variabel Proses terhadap Gaya Tekan

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	% kontribusi
PA	2	26459	13230	41,24	0,000	33,36
Vf	2	43880	21940	68,4	0,000	55,87
Error	22	7057	321			10,78
Total	26	77397				100,00

S = 17,9100 R-Sq = 90,88% R-Sq(adj) = 89,22%

Tabel 7. ANOVA Variabel Proses terhadap Delaminasi

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	% kontribusi
PA	2	0,24752	0,12376	31,68	0,000	44,22
Vf	2	0,20862	0,10431	26,7	0,000	37,04
Error	22	0,08594	0,00391			18,74
Total	26	0,54208				100,00

S = 0,0625022 R-Sq = 84,15% R-Sq(adj) = 81,26%

Berdasarkan ANOVA dapat dijabarkan pengaruh variabel proses terhadap respon gaya tekan dan delaminasi sebagai berikut:

3.2.1. Pengaruh variabel proses terhadap gaya tekan

Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis untuk variabel proses sudut ujung pahat dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

$$H_0 : PA_1 = PA_2$$

$$H_1 : PA_1 \neq PA_2$$

Kesimpulan: $F_{hitung} = 41,24 > F_{(0,05;2;24)} = 3,4$ maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh yang signifikan sudut

ujung pahat terhadap respon gaya tekan. *P-value* menunjukkan angka sebesar $0,000 < 0,05$, sehingga ini juga mengkonfirmasi bahwa variabel proses sudut ujung pahat berpengaruh signifikan terhadap respon gaya tekan dengan tingkat keyakinan sebesar 95%.

Sedangkan Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis untuk variabel proses kecepatan makan dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

$$H_0 : V_{f1} = V_{f2}$$

$$H_1 : V_{f1} \neq V_{f2}$$

Kesimpulan: $F_{hitung} = 68,40 > F_{(0,05;2;24)} = 3,4$ maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh yang signifikan kecepatan makan terhadap respon gaya tekan. *P-value* menunjukkan angka sebesar $0,000 < 0,05$, sehingga ini juga mengkonfirmasi bahwa variabel proses kecepatan makan berpengaruh signifikan terhadap respon gaya tekan dengan tingkat keyakinan sebesar 95%.

3.2.2 Pengaruh variabel proses terhadap delaminasi

Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis untuk variabel proses sudut ujung pahat dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

$$H_0 : PA_1 = PA_2$$

$$H_1 : PA_1 \neq PA_2$$

Kesimpulan: $F_{hitung} = 31,68 > F_{(0,05;2;24)} = 3,4$ maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh yang signifikan sudut ujung pahat terhadap respon delaminasi. *P-value* menunjukkan angka sebesar $0,000 < 0,05$, sehingga ini juga mengkonfirmasi bahwa variabel proses sudut ujung pahat berpengaruh signifikan terhadap respon delaminasi dengan tingkat keyakinan sebesar 95%.

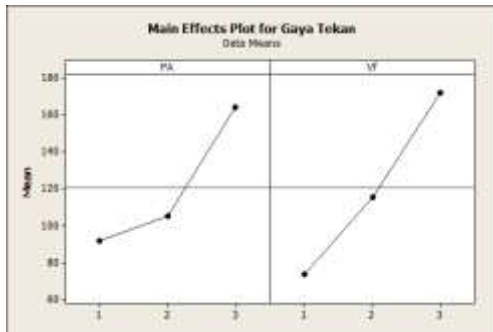
Sedangkan Hipotesis nol dan hipotesis alternatif yang digunakan pada uji hipotesis untuk variabel proses kecepatan makan dengan menggunakan distribusi F adalah sebagai berikut:

$$H_0 : V_{f1} = V_{f2}$$

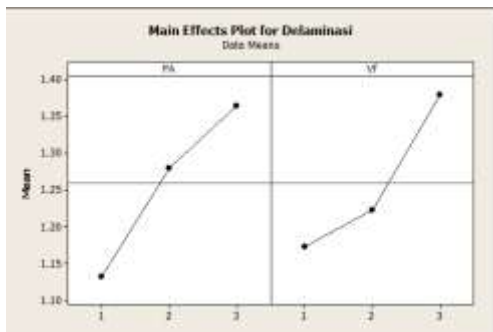
$$H_1 : V_{f1} \neq V_{f2}$$

Kesimpulan: $F_{hitung} = 26,70 > F_{(0,05;2;24)} = 3,4$ maka H_0 ditolak, artinya ada pengaruh yang signifikan kecepatan makan terhadap respon delaminasi. *P-value* menunjukkan angka sebesar $0,000 < 0,05$, sehingga ini juga mengkonfirmasi bahwa variabel proses kecepatan makan berpengaruh signifikan terhadap respon delaminasi dengan tingkat keyakinan sebesar 95%.

Berdasarkan Tabel 4, faktor-faktor yang signifikan secara statistik mempengaruhi gaya tekan adalah sudut ujung pahat dan kecepatan makan. Kontribusi terbesar terhadap respon gaya tekan diberikan oleh kecepatan makan, yaitu sebesar 55,87%, diikuti oleh sudut ujung pahat yaitu sebesar 33,36%. Kemudian berdasarkan Tabel 5, faktor-faktor yang signifikan secara statistik mempengaruhi delaminasi adalah sudut ujung pahat dan kecepatan makan. Kontribusi terbesar terhadap respon delaminasi diberikan oleh sudut ujung pahat, yaitu sebesar 44,22%, diikuti oleh kecepatan makan yaitu sebesar 37,04%. Untuk mengetahui pengaruh tiap level dari variabel proses terhadap variabel respon dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Main effects plot variabel proses terhadap respon gaya tekan



Gambar 7. Main effects plot variabel proses terhadap respon delaminasi

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa peningkatan sudut ujung pahat akan meningkatkan gaya tekan, sedangkan peningkatan kecepatan makan akan meningkatkan kecepatan makan. Dari Gambar 7 dapat diketahui bahwa peningkatan sudut ujung pahat akan meningkatkan delaminasi, begitu pula dengan peningkatan kecepatan makan akan meningkatkan delaminasi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan dan analisis data dapat disimpulkan bahwa:

- Ada pengaruh variabel proses sudut ujung pahat dan kecepatan makan terhadap respon gaya tekan dan delaminasi.
- Kontribusi variabel-variabel proses penggurdian dalam mengurangi variasi respon gaya tekan adalah kecepatan makan sebesar 55,87% kemudian sudut ujung pahat sebesar 33,36%. Sedangkan untuk respon delaminasi adalah sudut ujung pahat sebesar 44,22% kemudian kecepatan makan sebesar 37,04%.
- Peningkatan sudut ujung pahat dan kecepatan makan akan meningkatkan gaya tekan dan delaminasi.

5. SARAN

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian adalah agar mencoba menggunakan level faktor yang lain, dan menambahkan faktor-faktor penting yang lain untuk mengurangi besarnya *error*. Pada penelitian ini kontribusi *error* masih sebesar 10,78% untuk respon gaya tekan dan 18,74% untuk respon delaminasi.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, "Manufacturing engineering and technology," *Manuf. Eng. Technol.*, 2014.
- [2] A. Mufarrih, "Pengaruh Parameter Proses Gurdi Terhadap Kekasaran Permukaan Pada Material KFRP Komposit," *Semin. Nas. Inov. Teknol.*, pp. 403–410, 2017.
- [3] L. Zheng, H. Zhou, C. Gao, and J. Yuan, "Hole drilling in ceramics/Kevlar fiber reinforced plastics double-plate composite armor using diamond core drill," *Mater. Des.*, vol. 40, pp. 461–466, 2012.
- [4] Nagaraja, M. a Herbert, D. Shetty, R. Shetty, and B. Shivamurthy, "Effect of Process Parameters on Delamination, Thrust force and Torque in Drilling of Carbon Fiber Epoxy Composite," *Res. J. Recent Sci.*, vol. 2, no. 8, pp. 47–51, 2013.
- [5] V. K. Vankanti and V. Ganta, "Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 35–41, 2014.
- [6] K. Palanikumar, "Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 44, no. 10, pp. 2138–2148, 2011.
- [7] K. Palanikumar, B. Latha, V. S. Senthilkumar, and J. P. Davim, "Analysis on drilling of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites using grey relational analysis," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 27, no. 3, pp. 297–305, 2012.
- [8] E. Kilickap, "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 8, pp. 6116–6122, 2010.
- [9] H. Vasudevan, R. R. Rajguru, and N. C. Deshpande, "Multiobjective Optimization of Drilling Characteristics for NEMA G-11 GFRP/Epoxy Composite using Desirability coupled with Taguchi Method," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 522–530, 2014.
- [10] A. Krishnamoorthy, S. Rajendra Boopathy, K. Palanikumar, and J. Paulo Davim, "Application of grey fuzzy logic for the optimization of drilling parameters for CFRP composites with multiple performance characteristics," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 45, no. 5, pp. 1286–1296, 2012.
- [11] A. Mufarrih, B. O. P. Soepangkat, and I. Krisnanto, "Multi Response Optimization Using Taguchi-Grey-Fuzzy Method in Drilling of Kevlar Fiber Reinforced Polymer (KFRP) Stacked," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 836, pp. 179–184, 2016.
- [12] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, and J. Paulo Davim, "Taguchi multiple-performance characteristics optimization in drilling of medium density fibreboard (MDF) to minimize delamination using utility concept," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 196, no. 1–3, pp. 73–78, 2008.