

# Analisis Pengaruh Proses Permesinan CNC Menggunakan *Endmill Two Flute* Terhadap Sirkularitas pada Material Komposit *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

Ahmad Yusran Aminy\*<sup>1</sup>, Formanto Paliling<sup>1</sup>, Azwar Hayat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

\*Email: ahmadyusrana@yahoo.co.id

DOI: 10.25042/jpe.112020.13

## Abstrak

Serat karbon sebagai salah satu bagian dari sebuah material komposit mulai menjadi perhatian penting bagi peneliti. Keunggulan dari material serat karbon dapat digabungkan dengan keunggulan material lainnya yang akan menghasilkan material berkarakteristik berbeda dengan material-material penyusunnya. Yang menjadi kendala saat ini adalah bagaimana perubahan karakteristik material komposit terutama yang berbahan dasar serat karbon terhadap proses permesinan yang diberikan kepadanya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter permesinan yaitu variasi pemakanan (*feed rate*) dan kecepatan spindle dalam proses pengeboran material *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) menggunakan *endmill* diameter 6, 8 dan 10 mm yang dikaitkan dengan sirkularitas hasil pelubangan material CFRP. Bahan uji CFRP yang digunakan adalah gabungan dari 2 jenis orientasi serat karbon ( $0^{\circ}/90^{\circ}$  dan  $40^{\circ}/130^{\circ}$ ) yang dikat menjadi satu oleh matrix komposit resin. Parameter permesinan yang digunakan yaitu; pemakanan (*feed rate*) yang digunakan adalah 40, 50 dan 60 mm/min dan kecepatan spindle 500, 1000 dan 2000 RPM. Metode yang digunakan untuk menganalisis kualitas hasil sirkularitas secara visual adalah Image Pro Plus. ANOVA dan Taguchi digunakan untuk analisis data. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa untuk meminimalkan kerusakan sirkularitas material CFRP pada lubang pengeboran diameter 6 direkomendasikan penggunaan pemakanan 40 mm/min dan spindle 1000 RPM dan 2000 RPM. Untuk diameter 8 mm direkomendasikan pemakanan 60 mm/min dan 1000 RPM. Sedangkan untuk diameter 10 mm direkomendasikan pemakanan 50 mm/min dan kecepatan spindle 1000 RPM dan 2000 RPM.

## Abstract

**Analysis of the Effect of CNC Machining Process using a Two-flute Endmill on Circularity in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Materials.** Carbon fiber as part of a composite material is starting to become an important concern for researchers. The advantages of carbon fiber materials can be combined with the advantages of other materials that will produce materials that have different characteristics materials. The current obstacle is how to measure the characteristics of composite materials, especially those based on carbon fiber, change to the machining process given to them. This study aims to determine the influence of machining parameters, namely feed rate variations and spindle speeds in the process of drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) materials using endmill diameters of 6, 8 and 10 mm which are associated with circularity of CFRP material drilling results. The CFRP materials used in the study utilized 2 type of carbon fiber orientations ( $0^{\circ}/90^{\circ}$  and  $40^{\circ}/130^{\circ}$ ) that are combined into one by resin composite matrix. The machining parameters used are; feed rates of 40, 50 and 60 mm/min and spindle speeds of 500, 1000 and 2000 RPM. The software used to visually analyze the quality of circularity results is Image Pro Plus. ANOVA and Taguchi are used for data analysis. The results of this study show that to minimize circularity damage CFRP material in drilling holes diameter 6 recommended the use of 40 mm/min feed rate and spindles speed of 1000 RPM and 2000 RPM. For diameters of 8 mm recommended feed rate 60 mm/min and spindle speed of 1000 RPM. As for the diameter of 10 mm recommended feed rate of 50 mm/min and spindle speed of 1000 RPM and 2000 RPM.

**Kata Kunci:** Carbon fiber reinforced polymer, CNC, proses permesinan, sirkularitas

## 1. Pendahuluan

Penggunaan material carbon fiber saat sekarang ini mulai banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari karena penggunaannya yang sangat efektif dan biayanya yang relatif terjangkau. Permintaan material CFRP meningkat pesat dalam berbagai sektor misalnya

otomotif, dirgantara dan beberapa sektor manufaktur lainnya [1], [2]. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh kecepatan spindle dan laju pemakanan *endmill two flute* terhadap sirkularitas lubang material CFRP. Penggunaan material komposit di industri manufaktur terutama industri dirgantara tidak



terlepas dari pembuatan komponen seperti ekor pesawat yang pengerjaannya memerlukan pengeboran untuk mendapatkan akurasi lubang yang baik [3]. Orientasi serat yang digunakan dalam penelitian ini ada dua jenis yaitu  $0^{\circ}/90^{\circ}$  dan  $40^{\circ}/130^{\circ}$ . sehingga diharapkan dapat meningkatkan kualitas lubang material CFRP [4].

Untuk itu hubungan antara serat yang divariasikan diatas dapat kita ketahui dengan melakukan atau memadukan beberapa parameter pemotongan yaitu *feed rate* dan kecepatan spindle dengan menggunakan *endmill two flute*, sehingga kita dapat mengetahui pengaruh parameter pemotongan terhadap sirkularitas material CFRP [5]. Tantangan yang dilakukan dalam pengeboran CFRP untuk mendapatkan kualitas lubang yang baik memang sangatlah sulit, sehingga sekarang masih banyak penelitian yang mencari tahu bagaimana dan apa jenis parameter yang baik untuk digunakan terutama tak lepas juga dari masalah serat yang divariasikan arahnya dan juga pemakanan yang baik [6].

Untuk pengeboran material CFRP dalam penelitian ini menggunakan mesin CNC dengan tipe mata pisau yang digunakan adalah *endmill two flute* yang terdiri dari tiga diameter 6 mm, 8 mm, dan 10 mm. Mata pisau yang digunakan akan diamati bagaimana dapat menghasilkan sirkularitas yang baik sehingga peneliti dapat melihat seberapa baik dan pengaruh yang dihasilkan mata pisau frais ini [7] dan juga bagaimana pengaruh dari tiap diameter pemotongan yang dihasilkan setelah pengeboran selesai dilakukan [8].

Dalam sebuah pengeboran dimana kita memerlukan sebuah kualitas pengeboran yang baik tentunya perlu untuk mengetahui parameter pemotongan di dalamnya. Kualitas yang dimaksud dalam penelitian ini adalah didefinisikan sebagai sirkularitas. Sirkularitas adalah tingkat kebulatan diameter hasil pengeboran yang dilakukan. Untuk memperoleh tingkat kualitas sirkularitas yang tinggi tentunya parameter pemotongan perlu untuk dan diamati dan dianalisa. Untuk pengamatan visual dapat digunakan bantuan perangkat lunak pengolah gambar.

Untuk Analisa parameter permesinan digunakan ANOVA sehingga kita dapat mengetahui parameter permesinan mana yang paling berpengaruh dalam penelitian ini.

Meskipun beberapa penelitian mengenai bagaimana kualitas lubang yang baik saat pengeboran tetapi masih sangat sedikit penelitian yang mengulas tentang pengeboran material CFRP yang berkaitan dengan arah orientasi serat karbon. Strategi dengan menggunakan arah serat yang tepat memang sangatlah dibutuhkan untuk mengetahui kualitas lubang material CFRP, sehingga dalam penelitiannya Gaiyun menggunakan arah serat  $90^{\circ}$  untuk mengetahui sirkularitas material CFRP [9].

Jenis pengeboran yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengeboran dengan tipe kering, sehingga pengeboran yang dilakukan dapat lebih optimal [10] dan pengamatan sirkularitas saat eksperimen dilakukan peneliti dapat melihat proses pengeboran dengan baik sehingga tujuan utama dalam mengamati kualitas lubang berdasarkan sirkularitas bisa diamati dengan lebih baik [11], untuk dapat mengetahui bagaimana parameter pemotongan dengan benar pada anyaman serat karbon [12].

Dalam meneliti sebuah pengeboran untuk akurasi lubang yang lebih baik tentunya juga dipengaruhi kecepatan putaran spindle [13] baik cepat atau tidaknya putaran spindle juga dapat diamati dalam eksperimen ini bagaimana proses fenomena sirkularitas yang terjadi saat proses pemotongan berlangsung. Untuk itu perlunya memvariasikan pemakanan dan kecepatan spindle serta mengamati dampak yang terjadi [14], [15]. Sehingga dalam pengamatan dalam menganalisa kualitas lubang material CFRP dapat lebih optimal terhadap pengaruh variabel permesinan yang diberikan [16].

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Proses Permesinan

Dalam penelitian ini mesin yang digunakan adalah mesin CNC Control T.U. 3A (Gambar 1), mesin ini tergolong mampu untuk melakukan berbagai pengerjaan produksi dalam permesinan. Pengerjaan yang dilakukan bisa sampai tiga sumbu axis. Tujuan dari penelitian untuk menggunakan mesin ini adalah untuk mendapatkan akurasi yang lebih baik. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan keakurasian yang lebih optimal daripada menggunakan mesin gurdi biasa.

Cara kerja proses permesinan ini dengan memberikan program dengan variasi pemakanan dan kecepatan putaran spindle yang bervariasi



sehingga peneliti dapat mengamati proses permesinan yang terjadi. Posisi pengeboran yang digunakan adalah pengeboran tegak lurus terhadap bidang benda kerja sehingga akurasi pengeboran yang diperoleh akan lebih baik. Dengan menggunakan mesin ini peran manusia (*human error*) bisa diminimalisir untuk mendapatkan keakurasian yang lebih baik saat proses pengeboran material komposit CFRP.



Gambar 1. CNC Control T.U. 3A

## 2.2. Mata Pisau *Endmill Two flute*

Pada Gambar 2 dapat dilihat sebuah bentuk mata pisau frais *endmill* dengan dua mata pisau yang akan digunakan, dengan *endmill* type karbida untuk mengurangi panas yang terjadi saat pengeboran, terutama pengeboran yang akan dilakukan adalah pengeboran tipe kering sehingga untuk melihat bagaimana hasil pengukuran kualitas lubang material CFRP yang dihasilkan, dengan cara memvariasikan kecepatan spindel dan laju pemakanan pada mesin agar peneliti dapat melihat fenomena yang terjadi selama proses pengeboran dengan menggunakan mata pisau *endmill two flutes*.



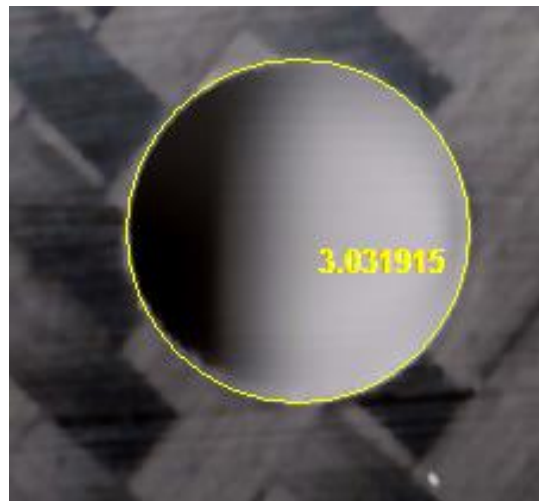
Gambar 2. *Endmill Two flute*

## 3. Pengukuran Kualitas Lubang Material CFRP

### 3.1. Sirkularitas

Sirkularitas di dalam penelitian ini adalah meliputi pengukuran gambar dengan bantuan perangkat lunak Image Pro Plus. Sebelum melakukan pengukuran sirkularitas dalam material CFRP perangkat lunak yang digunakan haruslah dikalibrasi terlebih dahulu, sehingga saat pengambilan data pengambilan gambar lebih

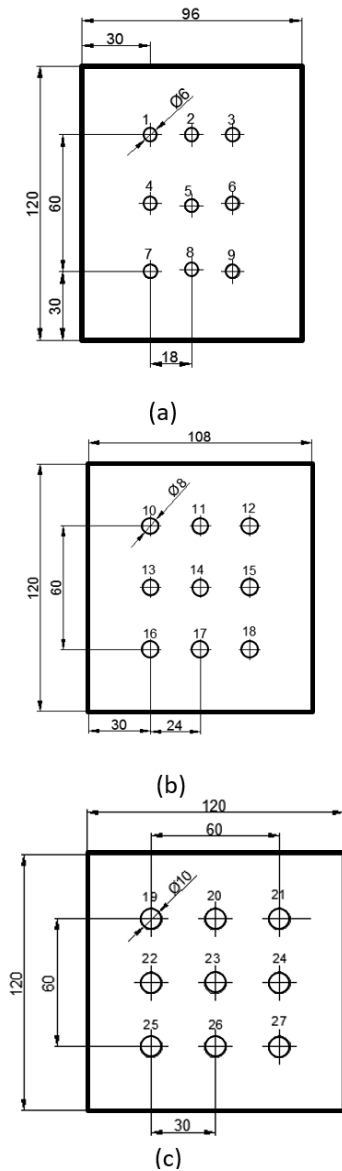
akurat. Pada Gambar 3 yang diperlihatkan adalah salah satu contoh pengambilan gambar menggunakan teknik scanning perangkat lunak Image Pro Plus.



Gambar 3. Pengambilan data sirkularitas material CFRP menggunakan analisa scanning gambar

Dalam Gambar 3, pengambilan gambar dengan mengambil hasil sirkularitas pada permukaan material Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Gambar tersebut diperlihatkan hasil pengeboran dengan diameter *endmill* 6 mm, angka 3,031915 mm adalah angka jari-jari ( $r$ ) yang diperlihatkan oleh gambar hasil pengukuran Image Pro Plus sehingga untuk mengetahui hasil *scanning* sirkularitas gambar digunakan persamaan  $diameter=2r$  sehingga hasil sirkularitas yang didapatkan *endmill* diameter 6 mm adalah 6,06383 mm atau 6,063 mm. Rangkuman hasil pengukuran sirkularitas yang lainnya dapat dilihat di Tabel 1, Tabel 3, dan Tabel 5. Dari perhitungan hasil *scanning* perangkat lunak di atas hasil yang kita ketahui akan lebih baik dan akurat.

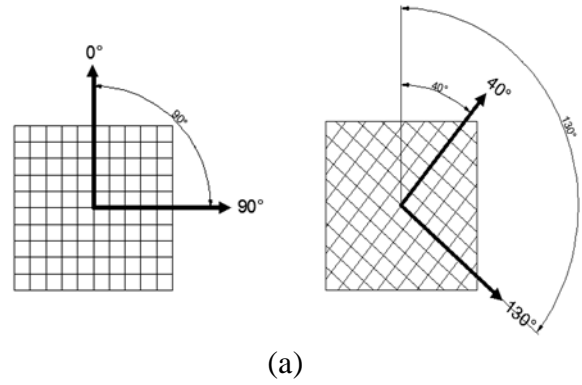
Gambar 4(a) memperlihatkan dimensi dan ukuran *endmill* yang digunakan yaitu 6 mm serta jarak antara lubang yang satu dengan yang lainnya adalah 18 mm dengan nomor lubang 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan Gambar 4(b) Dimensi yang berbeda dengan nomor lubang 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 dengan jarak antar lubang 24 mm dengan diameter *endmill* yang digunakan 8 mm, sedangkan pada Gambar 4(c) memperlihatkan nomor lubang 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 dengan jarak 30 mm dengan diameter *endmill* 10 mm



Gambar 4. (a) Endmill diameter 6 mm (b) Endmill diameter 8 mm, dan (c) Endmill diameter 10 mm

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan dua jenis orientasi serat ( $0^0/90^0$ , dan  $40^0/130^0$ ) yang disusun bertingkat menjadi satu kesatuan material komposit CFRP. Hasil pengaruh pengeboran dan hasil sirkularitas yang didapatkan terhadap dua jenis orientasi serat berbeda yang digunakan sebagai penyusun CFRP. Pada gambar 5(a) memperlihatkan orientasi serat dan Gambar 5(b) menunjukkan susunan material pembentuk bahan uji yang digunakan.

Peneliti akan mengamati fenomena hasil keakurasian sirkularitas lubang dengan penggabungan jenis orientasi di atas. Dengan penambahan dua orientasi diatas maka diharapkan dapat menambah keakurasian lubang material komposit carbon fiber reinforced polymer.



(a)

Lem/resin epoxy
CFRP 40°/130°
Lem/resin epoxy
CFRP 0°/90°
Lem/resin epoxy
CFRP 40°/130°
Lem/resin epoxy

(b)

Gambar 5. (a) Menunjukkan arah serat karbon  $0^0/90^0$  dan  $40^0/130^0$  (b) Menunjukkan susunan material pembentuk bahan uji

### 3.2. Teknik Analisa Data

Pengambilan data dilakukan setelah proses permesinan telah selesai dilakukan, kemudian proses pengambilan data dapat dilakukan dengan baik. Untuk data yang berupa angka akan ditabelkan untuk dianalisis menggunakan teknik ANOVA dan Taguchi. Data hasil tersebut dianalisa teknik Taguchi yang dilakukan menggunakan persamaan:

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

yang artinya adalah *smaller the better characteristic* kemudian dianalisa dan disimpulkan.

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Deskripsi Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini ditampilkan merupakan grafik *surface/permukaan* yang diharapkan. Grafik tersebut dapat memberikan gambaran jelas bagaimana interaksi hubungan antara parameter *feed rate* dan kecepatan spindle terhadap sirkularitas material CFRP.



**Tabel 1. Hasil pengukuran sirkularitas dengan diameter *endmill* 6 mm**

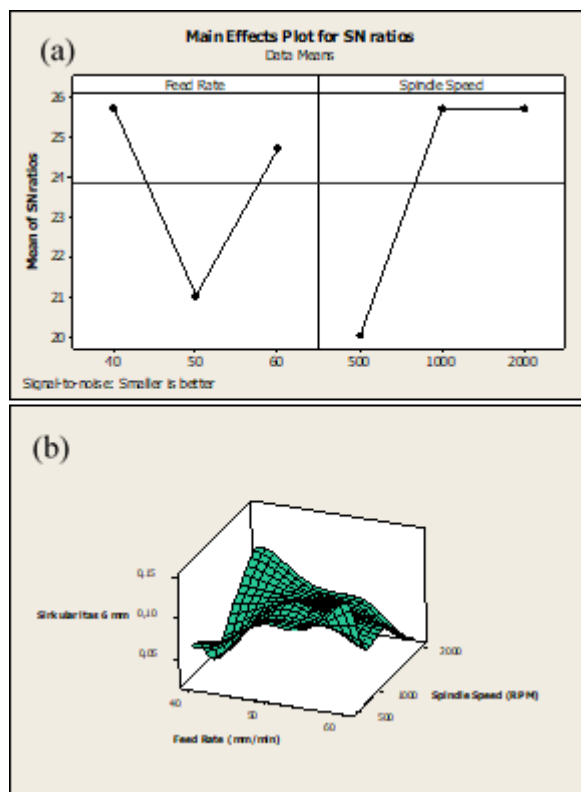
No	Spindel (RPM)	Feed rate (mm/min)	Sirkularitas (mm)
1	500	40	0,063
4	1000	40	0,021
7	2000	40	0,105
2	500	50	0,105
5	1000	50	0,105
8	2000	50	0,063
3	500	60	0,148
6	1000	60	0,063
9	2000	60	0,021

Tabel 1 merupakan hasil sirkularitas dari Gambar 3 yang di dalam Tabel 1 terdapat variabel sirkularitas dengan diameter *endmill* 6 mm dan di dalamnya ada *feed rate* dan kecepatan spindel yang divariasikan terhadap sirkularitas. Dari Tabel 1 kemudian disimulasikan menggunakan ANOVA-Two Way seperti pada Tabel 2, hasil dari Tabel 2 ANOVA tersebut kemudian diamati bahwa *feed rate* memiliki pengaruh lebih besar yaitu 25,14% sedangkan kecepatan spindel memiliki pengaruh sebesar 8,26% dan error menunjukkan pengaruh lain yang belum didefinisikan pada ANOVA sehingga perlu dianalisis lanjut dengan metode Taguchi.

**Tabel 2. Hasil pengujian Two-Way ANOVA dengan diameter *endmill* 6 mm**

Source	DF	SS	F	P	Kontribusi
Feed rate	2	0,0011762	0,25	0,792	8,26%
Spindle	2	0,0035842	0,76	0,527	25,14%
Error	4	0,0094924			66,60%
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>0,0142529</b>			

Gambar 6(a) menunjukkan pengaruh kualitas lubang sirkularitas pengeboran pada diameter 6 mm. Nilai optimal yang diperoleh pada *feed rate* sebesar 40 mm/min, dan pada kecepatan spindel nilai paling optimalnya adalah pada 1000 RPM dan 2000 RPM. Sedangkan Gambar 6(b) menunjukkan interaksi kecepatan spindel dan *feed rate*, dan faktor sirkularitas paling minimum adalah laju pemakanan 40 mm/min dan kecepatan spindel 2000 rpm. Dari Tabel 3 merupakan hasil sirkularitas dari Gambar 3 yang didalam Tabel 3 ada variabel sirkularitas dengan diameter *endmill* 8 mm dan di dalamnya ada *feed rate* dan kecepatan spindel yang divariasikan terhadap sirkularitas.



**Gambar 6. (a) Rasio S/N terhadap sirkularitas 6 mm, (b) Grafik interaksi 3D (F x N) pada diameter *endmill* 6 mm**

**Tabel 3. Hasil Pengukuran sirkularitas dengan diameter *endmill* 8 mm**

No	Spindel (RPM)	Feed rate (mm/min)	Sirkularitas (mm)
10	500	40	0,127
13	1000	40	0,170
16	2000	40	0,042
11	500	50	0,170
14	1000	50	0,085
17	2000	50	0,127
12	500	60	0,042
15	1000	60	0,042
18	2000	60	0,170

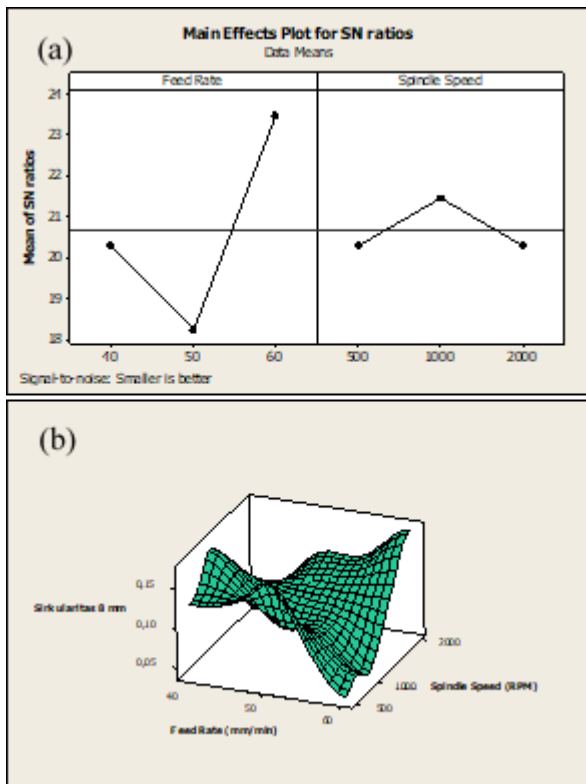
Dari Tabel 3 kemudian disimulasikan dengan menggunakan ANOVA-Two Way seperti pada Tabel 4, hasil dari Tabel 4 ANOVA tersebut kemudian diamati bahwa *feed rate* memiliki pengaruh lebih kecil yaitu 1,51% sedangkan kecepatan spindel memiliki pengaruh sebesar 10,95% dan Error menunjukkan pengaruh lain yang belum didefinisikan pada ANOVA sehingga perlu dianalisis lanjut dengan metode Taguchi.



**Tabel 4. Hasil pengujian Two-Way ANOVA dengan diameter endmill 8 mm**

Source	DF	SS	F	P	Kontribusi
Feed rate	2	0,0028287	0,25	0,790	10,95%
Spindle	2	0,0003920	0,03	0,966	1,55%
Error	4	0,0226293			87,54%
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>0,0258500</b>			

Gambar 7(a) menunjukkan pengaruh kualitas lubang sirkularitas pengeboran pada diameter 8 mm. Nilai optimal yang diperoleh pada *feed rate* sebesar 60 mm/min, dan pada kecepatan spindle nilai paling optimalnya adalah 1000 RPM. Sedangkan Gambar 7(b) menunjukkan interaksi kecepatan spindle dan *feed rate*, dan faktor sirkularitas paling minimum adalah laju pemakanan 60 mm/min dan kecepatan spindle 500 RPM.



**Gambar 7. (a) Rasio S/N terhadap sirkularitas 8 mm, (b) Grafik nteraksi 3D (F x N) pada diameter endmill 8 mm**

Tabel 5 merupakan hasil sirkularitas yang didalam Tabel 5 ada variabel sirkularitas dengan diameter endmill 10 mm dan di dalamnya ada feed rate dan kecepatan spindle yang divariasikan terhadap sirkularitas.

**Tabel 5. Hasil pengukuran sirkularitas dengan diameter endmill 10 mm**

No	Spindel (RPM)	Feed rate (mm/min)	Sirkularitas (mm)
19	500	40	0,043
22	1000	40	0,17
25	2000	40	0,085
20	500	50	0,17
23	1000	50	0,043
26	2000	50	0,043
21	500	60	0,128
24	1000	60	0,085
27	2000	60	0,17

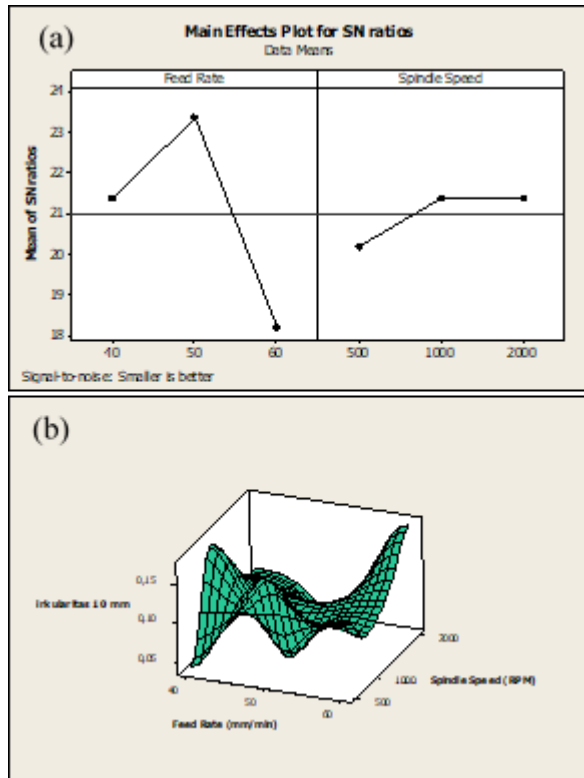
**Tabel 6. Hasil pengujian Two-Way ANOVA dengan diameter endmill 10 mm**

Source	DF	SS	F	P	Kontribusi
Feed rate	2	0,0027909	0,25	0,790	10,94%
Spindle	2	0,0004109	0,04	0,964	1,60%
Error	4	0,0223271			87464%
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>0,0255289</b>			

Dari Tabel 5 kemudian disimulasikan dengan ANOVA-Two Way seperti pada Tabel 6. Hasil dari Tabel 6 ANOVA tersebut kemudian diamati bahwa *feed rate* memiliki pengaruh lebih kecil yaitu 1,60% sedangkan kecepatan spindle memiliki pengaruh sebesar 10,94% dan error menunjukkan pengaruh lain yang belum didefinisikan pada ANOVA sehingga perlu dianalisis lanjut dengan metode Taguchi.

Gambar 8(a) menunjukkan pengaruh kualitas lubang sirkularitas pengeboran pada diameter 10 mm. Nilai optimal yang diperoleh pada *feed rate* sebesar 50 mm/min, pada kecepatan spindle nilai paling optimalnya adalah 1000 RPM dan 2000 RPM. Sedangkan Gambar 6(b) menunjukkan interaksi kecepatan spindle dan *feed rate*, dan faktor sirkularitas paling minimum adalah laju pemakanan 40 mm/min dan kecepatan spindle 1000 RPM.

Secara umum ditemukan bahwa *feed rate* memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan kecepatan spindle terhadap hasil sirkularitas pada material carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Hasil ini tidak secara signifikan karena  $P > 0,05$ . Penyebab utamanya adalah pengeboran yang dilakukan adalah pengeboran tegak lurus terhadap benda kerja dengan sudut terbentuk 90°, sehingga *feed rate* tidak secara signifikan berpengaruh.



**Gambar 8. (a) Rasio S/N terhadap sirkularitas 10 mm, (b) Interaksi 3D (F x N) pada diameter endmill 10 mm**

Untuk menjelaskan error yang besar pada hasil ANOVA perlu dikaji ulang dengan memperhatikan parameter tidak terukur seperti getaran mesin dan benda kerja yang terjadi, tingkat kekakuan kepala spindle, umur pahat dan lain sebagainya sehingga pada akhirnya seluruh parameter permesinan akan terbaca kontribusinya pada hasil pengeboran.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dapat disimpulkan bahwa *feed rate* memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan kecepatan spindle terhadap fenomena sirkularitas material *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) meskipun hal tersebut tidak secara signifikan. Hal ini terjadi karena geometri pemotongan pada penelitian ini tegak lurus terhadap benda kerja sehingga *feed rate* tidak secara signifikan berpengaruh. Berdasarkan optimasi Taguchi untuk meminimalkan kerusakan sirkularitas CFRP pada diameter 6 menggunakan *feed rate* 40 mm/min dan spindle 1000 RPM dan 2000 RPM. Untuk diameter 8 mm menggunakan pemakaian 60 mm/min dan 1000 RPM. Sedangkan untuk diameter 10 mm menggunakan pemakaian 50 mm/min dan kecepatan spindle 1000 RPM dan 2000 RPM.

## Referensi

- [1] A. Caggiano, R. Angelone, and R. Teti, "Image Analysis for CFRP Drilled Hole Quality Assessment," in *Procedia CIRP*, 2017, pp. 440–445.
- [2] J. Richard *et al.*, "Wet vs Dry CFRP Drilling: Influence of Cutting Fluid on Tool Performance," in *Procedia CIRP*, 2018, pp. 315–319.
- [3] I. S. Shyha *et al.*, "Hole Quality Assessment Following Drilling of Metallic-Composite Stacks," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 51, no. 7–8, pp. 569–578, 2011.
- [4] M. Altin *et al.*, "Optimization of Machining Parameters for Kerf Angle and Roundness Error in Abrasive Water Jet Drilling of CFRP Composites with Different Fiber Orientation Angles," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 1–27, 2020.
- [5] T. Barik, S. Parimita, and K. Pal, "Parametric Study and Process Monitoring on Drilling of CFRP Composites," in *Proceeding of 10th International Conference on Precision, Meso, Micro and Nano Engineering (COPEN 10)*, 2017, pp. 953–957.
- [6] M. S. Sakib *et al.*, "Roundness and Taper of Holes During Drilling Composites of Various Thickness by HSS Drill Bit under Dry Condition," in *Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS2017)*, 2017, pp. 1–6.
- [7] C. Xu *et al.*, "Design of Internal-Chip-Removal Drill for CFRP Drilling and Study of Influencing Factors of Drilling Quality," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 5–6, pp. 1657–1669, 2019.
- [8] R. Zitoune, V. Krishnaraj, and F. Collombet, "Study of Drilling of Composite Material and Aluminium Stack," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 5, pp. 1246–1255, 2010.
- [9] H. Gaiyun and Q. Xuda, "Helical Milling of CFRP/Ti-6Al-4V Stacks with Varying Machining Parameters," *Trans. Tianjin Univ.*, vol. 21, no. 1, pp. 56–63, 2015.
- [10] N. Khanna *et al.*, "Measurement and Evaluation of Hole Attributes for Drilling CFRP Composites using an Indigenously Developed Cryogenic Machining Facility," *Measurement*, vol. 154, 2020.
- [11] F. Makhadmeh *et al.*, "Effect of Ultrasonically-Assisted Drilling on Carbon-Fibre-Reinforced Plastics," *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 23, pp. 5939–5952, 2014.
- [12] K. Thongkaew, J. Wang, and G. Heng, "An Investigation of Hole Machining Process on a Carbon-fiber Reinforced Plastic Sheet by Abrasive Waterjet," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1136, pp. 113–118, 2016.
- [13] L. Zhou *et al.*, "Hole Diameter Variation and Roundness in Dry Orbital Drilling of CFRP/Ti Stacks," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, pp. 811–824, 2016.
- [14] T. Barik *et al.*, "Monitoring of Hole Surface Integrity in Drilling of Bi-Directional Woven Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites," in *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, pp. 2432–2458.



- [15] S. A. Ashrafi *et al.*, “Characterization and Effects of Fiber Pull-Outs in Hole Quality of Carbon Fiber Reinforced Plastics Composite,” *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 10, pp. 1–12, 2016.
- [16] N. Geier, J. P. Davim, and T. Szalay, “Advanced Cutting Tools and Technologies for Drilling Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Composites: A Review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 125, 2019.

