

Kesalahan Diameter Lubang Pada Pengeboran Tulang Kortikal

Gusri Akhyar Ibrahim^{a,1}, Arinal Hamni^a, Yannuar Burhannudin^a, Adilla Windi Warsito^a, Arzaq Guruh Dityamri^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Lampung, Lampung

¹gusri.akhyar@eng.unila.ac.id

ABSTRACT

Bone fracture is one form of orthopedic injury to the bone, which can cause a decrease in the body's support function. Bone drilling is done to connect broken bones so that it facilitates the healing or fixation process. Many parameters affect the success of bone drilling, including the speed of the drill bit, the feed rate, and the cutting conditions. This study aims to determine the effect of machining parameters on the error in the diameter of the drill hole in cortical bone. The material used in this study was bovine cortical bone, while the cutting process was carried out using a drill machine. The drill bit used was an orthopedic stainless steel type with a diameter of 3.2 mm. The hole diameter measurement was carried out using a profile projector, where the drill hole error was obtained by comparing the measurement results with the chisel diameter. The analysis was carried out using ANOVA with an RSM experimental design. The drilling parameters are rotational speed of 500 rpm, 1000 rpm, and 1500 rpm, then feed rate of 35 mm/min, 65 mm/min, and 85 mm/min, and dry coolant, NaCl, and Opsite. The research results show that drilling using opiate coolant with a combination of 35 mm/min feed rate parameters and a rotational speed of 1500 rpm produces a low diameter error rate.

Keywords: Drilling, bone, RSM, error, diameter.

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590802

PENDAHULUAN

Fraktur atau patah tulang merupakan salah satu jenis cedera ortopedi yang umum terjadi akibat kecelakaan atau kelainan tulang. Di Indonesia, insiden patah tulang menempati peringkat kedua setelah luka lecet/memar dan terkilir. Fraktur femur, yang terjadi pada tulang paha, merupakan salah satu jenis fraktur yang sering mengakibatkan cacat jangka panjang yang signifikan. Pengobatannya sering melibatkan prosedur bedah ortopedi seperti pengeboran tulang untuk memasang sekrup dan pelat guna memperbaiki patah tulang (Bohra et al., 2021).

Pengeboran tulang adalah salah satu langkah dalam proses bedah ortopedi untuk fiksasi dan sering digunakan untuk membuat lubang kemudian memasukkan sekrup di tempat yang diperlukan (Alam dkk., 2009). Dalam banyak penelitian telah disebutkan bahwa karakteristik dari permukaan tulang setelah pengeboran berpengaruh pada hubungan struktural dan fungsional yang bersifat langsung antara tulang dan permukaan implan atau disebut dengan osseointegrasi.

Pada proses pengeboran tulang, kesalahan diameter lubang bor menjadi faktor kritis yang mempengaruhi kualitas

pemasangan sekrup. Hal ini berpengaruh terhadap stabilitas perlekatan antara implant dan tulang bahkan menjadi jaminan apakah sel jaringan akan dengan baik atau mengalami kerusakan berketerusan. Kesalahan diameter setelah pembuatan lubang akan menentukan kualitas penyambungan menggunakan baut atau sekrup. Oleh karena itu, usaha meminimalkan kesalahan pemasangan sekrup serta potensi komplikasi selama proses penyembuhan, sangat diperlukan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa parameter seperti sudut ujung pahat dan kecepatan makan pada proses pengeboran memiliki pengaruh signifikan terhadap diameter lubang. Mufaarrih dkk. (2022) melakukan analisis terhadap proses pengeboran material KFRP. Mereka menggunakan rancangan percobaan full faktorial dengan orthogonal array L9 dan dua kali replikasi. Variabel yang divariasikan adalah sudut ujung pahat (100°, 118°, 140°) dan kecepatan makan (50 mm/menit, 115 mm/menit, 180 mm/menit), dengan mengamati variabel respon berupa diameter. Penelitian dilakukan menggunakan mesin CNC *Milling* dengan pahat *twist drill* HSS Nachi berdiameter 10 mm. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa sudut ujung pahat dan kecepatan

makan berpengaruh signifikan terhadap diameter. Penyimpangan diameter dapat dikurangi dengan menggunakan sudut ujung pahat yang kecil dan kecepatan makan yang rendah.

Verma et al., (2020) menganalisis kekasaran permukaan pengeboran nanokomposit polimer menggunakan analisis ANOVA dalam investigasi ekperimental pada kekasaran permukaan dan kesalahan diameter. Jenis bahan yang digunakan yaitu HSS, Karbida, TiAIN. Pada ekperimen menunjukkan bahwa kecepatan spindle memiliki kontribusi sebesar 19,02%, laju pemakanan memiliki kontribusi sebesar 62,85% dan material berkontribusi sebesar 9,34%. Namun pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah HSS, Karbida, TiAIN dan metode analisis yang digunakan adalah analisis ANOVA.

Ibrahim dkk., (2019) menganalisis kekasaran dan diameter paduan magnesium pada pemesinan *drill* dengan menggunakan Metode Taguchi. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa parameter yang memberikan pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan adalah *lubricant* dengan nilai P 0,003 dan nilai F 86,98, diikuti oleh kecepatan putar dengan nilai P 0,031 dan nilai F 14,86. Sedangkan parameter yang memberikan pengaruh signifikan terhadap diameter adalah *lubricant* dengan nilai P 0,025 dan nilai F 17,51. Penggunaan kecepatan putar yang tinggi yaitu 890 rpm, gerak makan yang rendah yaitu 0,1 mm/mnt, *point angle* yang besar yaitu 65° dan *lubricant* dengan MQL minyak kelapa sawit memberikan hasil kekasaran permukaan dan diameter lubang yang terbaik. Akan tetapi pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah magnesium dan metode pelumas yang digunakan adalah MQL menggunakan minyak kelapa sawit dengan analisis Metode Taguchi. Namun, belum ada penelitian yang secara khusus menginvestigasi pengaruh parameter pemotongan terhadap diameter lubang tulang kortikal sapi menggunakan metode analisis *Response Surface Methodology* (RSM).

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dalam optimalisasi proses pengeboran tulang, khususnya pada penggunaan parameter pemotongan yang tepat untuk mencapai kesalahan diameter lubang bor yang optimal. Dengan demikian, dapat membantu mengurangi risiko komplikasi pada proses pemasangan sekrup dan memperbaiki stabilitas perlekatan implant dengan tulang.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tulang kortikal sapi. Peralatan utama yang digunakan adalah mesin CNC *milling*, pahat vor jenis stainless steel ortopedi, dan profil proyektor. Proses pengeboran dilakukan dengan

membersihkan tulang kortikal sapi dari daging daging yang masih menempel kemudian merendam tulang dengan menggunakan air campuran formalin agar tidak berbau menyengat, selanjutnya tulang dipotong menjadi bentuk persegi panjang dengan ukuran 2 cm x 5 cm. Kemudian tulang tersebut dilubangi menggunakan mesin CNC *milling*, di beberapa bagian, menggunakan diameter mata bor 3,2 mm..

Parameter pemesinan yang digunakan yaitu kecepatan putar (n) 500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, laju pemakanan (f) 35 mm/rev, 60 mm/rev, 85 mm/rev, dan cairan pendingin yang digunakan adalah NaCl dan Opsite. Alat yang digunakan untuk mengukur hasil kesalahan diameter adalah *profile projector*. sebelum membuat desain penelitian, perlu dilakukan penomoran coding untuk setiap parameter pemesinan. Penomoran coding parameter perlu dibuat sehingga dapat dilanjutkan disain detail penelitian dengan Design Expert. Adapun angka untuk faktor dan level yang digunakan saat proses pemesinan berlangsung dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pemesinan pengeboran tulang kortikal

No	Kecepatan Putar (n)	Laju Pemakanan (f)	Cairn pendingin (L)
	(rpm)	(mm/mnt)	(-)
1	500	35	Kering
2	1000	65	NaCl
3	1500	85	OpSite

Tabel 2 menunjukkan disain penelitian yang digunakan terdiri dari jenis faktor dan nomor coding yang digunakan dalam desain eksperimen *Box Behnken Design*. Untuk level rendah diberi tanda dengan -1, level tengah dengan 0, dan level tinggi diberikan tanda 1. Hal ini dilakukan untuk memudahkan dalam melakukan eksperimen. Dalam Metode *Box Behnken Design* digunakan kaedah pengulangan, dimana titik tengah (center point) diulang sebanyak tiga (3) kali. Pada penelitian ini, jumlah faktor yang digunakan adalah 3, masing-masing memiliki 3 level, dan dilakukan pengulangan titik pusat sebanyak 3 kali. Oleh karena itu, jumlah eksperimen yang dilakukan adalah 12 untuk 3 faktor dan 3 level, dan 3 kali pengulangan titik pusat. Jadi jumlah eksperimennya adalah sebanyak 15 kali. Secara detail jumlah eksperimen 15 kali dengan masing-masing kombinas sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Data run order BBD yang meunjuukan faktor dan nomor coding

No	Parameter pengeboran	Nomer coding BBD		
		-1	0	1
1	Kecepatan putar (n) (Rpm)	500	1000	1500
2	Laju pemakanan (f) (mm/rev)	35	60	85
3	Cairan pendingin	kering	NaCl	opsite

Tabel 3. Desain penelitian Box Behnken Design

Run order	Std order	Kode untuk variabel		
		Kec. putar (n) (rpm)	Laju pemakanan (mm/min)	Cairan pendingin
1	5	-1	0	-1
2	6	1	0	-1
3	8	1	0	1
4	2	1	-1	0
5	7	-1	0	1
6	9	0	-1	-1
7	1	-1	-1	0
8	3	-1	1	0
9	14	0	0	0
10	13	0	0	0
11	12	0	1	1
12	15	0	0	0
13	4	1	1	0
14	11	0	-1	1
15	10	0	1	-1

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran kesalahan diameter lubang bor menggunakan *profile projector* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Keadaan tidak bulat sempurna pada permukaan lobang (kesalahan diameter) ditandai oleh

perbedaan jarak titik-titik pada bentuk geometrik tersebut terhadap titik pusatnya (Yanis, 2010). Tabel 4 menampilkan hasil pengujian dari optimasi Box Behnken Design dengan 15 percobaan, di mana parameter yang diamati adalah kecepatan putar, laju pemakanan, dan cairan pendingin pada tiga tingkatan untuk setiap parameter.

Tabel 4. Hasil pengukuran kesalahan diameter lobang.

Run	Kecepatan putar (v) (rpm)	Laju pemakanan (Vf) (mm/min)	Cairan pendingin	Diameter Error
1	500	60	NaCl	0.055
2	1500	60	NaCl	0.0045
3	1500	60	Kering	0.00125
4	1500	35	OpSite	0.01075
5	500	60	Kering	0.00775
6	1000	35	NaCl	0.035
7	500	35	OpSite	0.007
8	500	85	OpSite	0.075
9	1000	60	OpSite	0.0425
10	1000	60	OpSite	0.067
11	1000	85	Kering	0.075
12	1000	60	OpSite	0.005
13	1500	85	OpSite	0.03225
14	1000	35	Kering	0.00575
15	1000	85	NaCl	0.06

Tabel 5 menunjukkan analisis varian atau ANOVA, yang mana digunakan sebagai dasar untuk memberikan keputusan terhadap hasil pengujian. Hal ini bertujuan mendukung penerimaan model matematis dan menentukan parameter pengeboran optimal, serta menentukan kesalahan diameter lubang bor tulang kortikal. Pengujian meliputi koefisien determinasi (R^2), *lack of fit*, dan uji F. Nilai R^2 sebesar 0.4010 menunjukkan kategori moderat, dengan hanya laju pemakanan berpengaruh signifikan sebesar 40.10% terhadap kesalahan diameter lubang bor, sehingga dikatakan faktor ini menjadi faktor yang memberikan dampak secara signifikan. Dalam penelitian statistik, nilai signifikan sebesar 5% adalah kriteria yang menyatakan apakah faktor tersebut berpengaruh signifikan atau tidak. Bila nilai signifikansinya kecil dari 5% maka faktor tersebut dinyatakan signifikan.

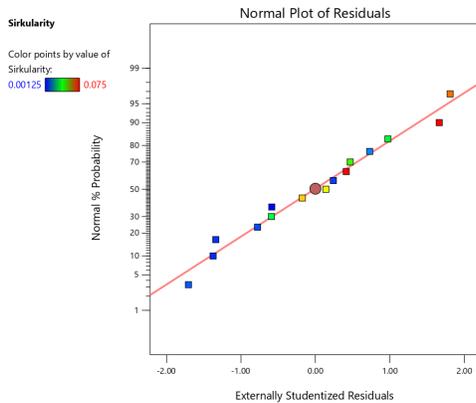
Sementara hasil pengujian menyatakan bahwa nilai P untuk faktor laju pemakanan adalah sebesar 0.0126, (nilai ini lebih kecil dari 0.05) maka dikatakan faktor tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kesalahan diameter lobang bor.

Sementara itu, nilai *lack of fit* sebesar 0.8767 (Tabel 5) menegaskan bahwa model linier yang dihasilkan bersifat sesuai dengan data yang ada. Demikian juga dengan nilai F_{hitung} sebesar 4.12. Nilai ini melebihi F_{tabel} sebesar 3.89, sehingga menunjukkan bahwa model regresi dapat diterima. Selain itu, pengujian koefisien regresi menunjukkan bahwa secara statistik, model linier berpengaruh pada kesalahan diameter lubang bor ($p\text{-value} = 0.0346$), dan laju pemakanan secara individu juga berpengaruh signifikan ($p\text{-value} = 0.0126$).

Tabel 5. Hasil Analisis ANOVA

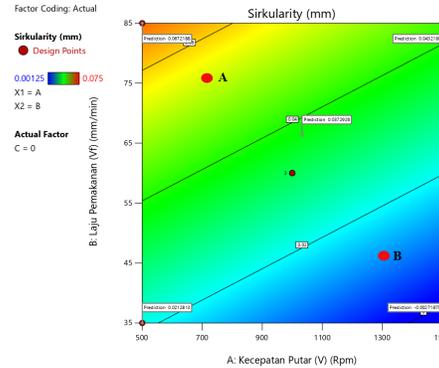
Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Model	0.0059	3	0.0020	4.12	0.0346	Significant
A-Kecepatan Putar (V)	0.0012	1	0.0012	2.42	0.1483	
B-Laju Pemakanan (Vf)	0.0042	1	0.0042	8.86	0.0126	Significat
C-Cairan Pendingin	0.0005	1	0.0005	1.10	0.3168	
Residual	0.0052	11	0.0005			
Lack of Fit	0.0033	9	0.0004	0.3751	0.8767	not significant
Pure Error	0.0020	2	0.0010			

Gambar 1 memperlihatkan bahwa residual plot sesuai dengan garis regresi model linier. Dimana residual berada pada garis regresi yang menyebar secara konstan tidak berjauhan. Hal ini dapat diartikan bahwa model linier yang digunakan pada data sesuai, tidak ada titik yang memiliki jarak berjauhan dari garis normal. Dengan demikian dikatakan pada data yang diperoleh bersifat normal, sehingga dapat dilanjutkan dengan analisis.



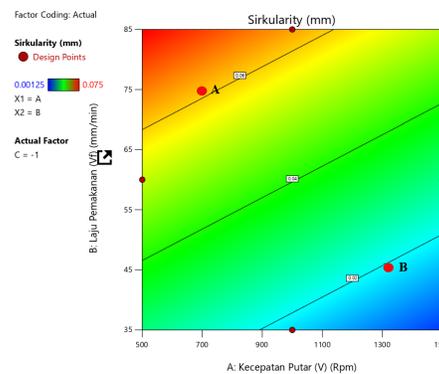
Gambar 1. Normal Plot of Residuals

Gambar 2 adalah grafik respon kesalahan diameter pada 2D Surface dengan menggunakan NaCl sebagai cairan pendingin. Grafik tersebut menjelaskan hubungan antara laju pemakanan (mm/min) dan kecepatan putar (rpm) dengan respon kesalahan diameter lubang berupa warna pada grafik. Dari keterangan grafik dapat dilihat bahwa nilai kesalahan diameter minimum terdapat pada warna biru yaitu sebesar 0,00125 mm dan nilai kesalahan diameter maksimum terdapat pada warna merah yaitu sebesar 0,075 mm. Pada titik A didapat nilai kesalahan diameter aman berada di warna hijau dengan laju pemakanan dan kecepatan putar sebesar 75 mm/min dan 700 Rpm. Pada titik ini, merupakan titik krusial karena nilai kesalahan diameter akan mendekati nilai maksimum apabila laju pemakanan semakin tinggi, namun tidak dengan kecepatan putar. Apabila kecepatan putar dipercepat, nilai kesalahan diameter tetap berada daerah aman berwarna hijau. Pada titik B didapat nilai kesalahan diameter rendah berada pada warna biru dengan laju pemakanan dan kecepatan putar sebesar 45 mm/min dan 1300 Rpm. Pada titik ini, nilai kesalahan diameter rendah dan akan tetap berada pada nilai kesalahan diameter yang aman apabila laju pemakanan dan kecepatan putar diperbesar.



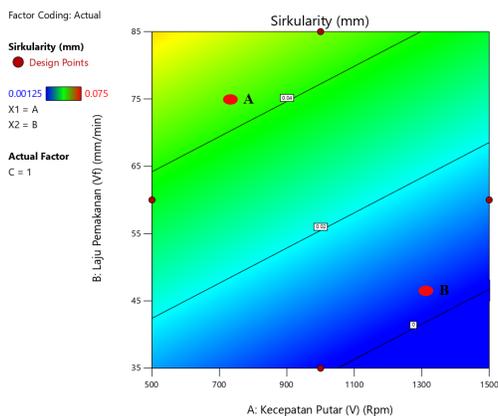
Gambar 2. Respon Kesalahan Diameter pada 2D Surface menggunakan NaCl

Gambar 3 adalah grafik respon kesalahan diameter pada 2D surface kering tanpa menggunakan cairan pendingin. Grafik tersebut menjelaskan hubungan antara laju pemakanan (mm/min) dan kecepatan putar (rpm) dengan respon kesalahan diameter lubang berupa warna pada grafik. Dari keterangan grafik dapat dilihat bahwa nilai kesalahan diameter minimum terdapat pada warna biru yaitu sebesar 0,00125 mm dan nilai kesalahan diameter maksimum terdapat pada warna merah yaitu sebesar 0,075 mm. Pada titik A didapat nilai kesalahan diameter berada di warna merah dengan laju pemakanan dan kecepatan putar sebesar 75 mm/min dan 700 rpm. Pada titik ini, merupakan titik tinggi karena nilai kesalahan diameter akan mendekati nilai maksimum apabila laju pemakanan semakin tinggi, namun tidak dengan kecepatan putar. Apabila kecepatan putar dipercepat, nilai kesalahan diameter akan berada daerah berwarna hijau. Pada titik B didapat nilai kesalahan diameter rendah berada pada warna biru dengan laju pemakanan dan kecepatan putar sebesar 45 mm/min dan 1300 Rpm. Pada titik ini, nilai kesalahan diameter rendah dan akan tetap berada pada nilai kesalahan diameter yang aman apabila laju pemakanan dan kecepatan putar diperbesar.



Gambar 3. Respon Kesalahan diameter pada 2D Surface Kering

Gambar 4 adalah grafik respon kesalahan diameter pada 2D Surface menggunakan OpSite sebagai cairan pendingin. Grafik tersebut menjelaskan hubungan antara laju pemakanan (mm/min) dan kecepatan putar (rpm) dengan respon kesalahan diameter lubang berupa warna pada grafik. Dari keterangan grafik dapat dilihat bahwa nilai kesalahan diameter minimum terdapat pada warna biru yaitu sebesar 0,00125 mm dan nilai kesalahan diameter maksimum terdapat pada warna merah yaitu sebesar 0,075 mm. Pada titik A didapat nilai kesalahan diameter berada di warna hijau dengan laju pemakanan dan kecepatan putar sebesar 75 mm/min dan 700 Rpm. Pada titik ini, merupakan titik tengah karena nilai kesalahan diameter tidak mendekati nilai maksimum apabila laju pemakanan semakin tinggi, begitu dengan kecepatan putar. Apabila kecepatan putar dipercepat, nilai kesalahan diameter akan tetap berada di daerah berwarna hijau. Pada titik B didapat nilai kesalahan diameter rendah berada pada warna biru dengan laju pemakanan dan kecepatan putar sebesar 45 mm/min dan 1300 Rpm. Pada titik ini, nilai kesalahan diameter akan tetap berada pada nilai kesalahan diameter yang rendah walaupun laju pemakanan dan kecepatan putar diperbesar.



Gambar 4. Respon kesalahan diameter pada 2D Surface menggunakan OpSite

Dari grafik – grafik di atas dapat dilihat bahwa laju pemakanan memiliki pengaruh yang signifikan. Pada grafik 3D Surface terlihat bahwa semakin besar laju pemakanan yang digunakan maka semakin besar pula nilai penyimpangan kesalahan diameter lubang. Hal ini sesuai dengan yang dijelaskan Ndaruhadi (2015) bahwa peningkatan laju pemakanan berbanding lurus terhadap pembesaran diameter, serta kesalahan diameter dan kesilindrisan dari lubang bor. Selain itu, pada semua kombinasi kondisi pemotongan terlihat bahwa laju pemakanan memberikan efek yang signifikan pada respon.

KESIMPULAN

1. Parameter pengeboran yang berpengaruh terhadap kesalahan diameter lubang bor adalah parameter laju pemakanan. Dengan signifikansi diperoleh nilai p-value lebih kecil dari nilai α yaitu sebesar 0,00126.
2. Pengeboran menggunakan cairan pendingin OpSite dengan kombinasi parameter laju pemakanan 35 mm/min dan kecepatan putar 1500 rpm, didapatkan hasil diameter rendah

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Alam, K., Mitrofanov, A. V., & Silberschmidt, V. V. (2009). Measurements of surface roughness in conventional and ultrasonically assisted bone drilling. *American Journal of Biomedical Sciences*, 1(4), 312-320.
- [2]. Bohra, A., Chandrasekaran, M., & Teyi, N. (2019, July). Bone drilling investigation and possible research: A state of the art review. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2128, No. 1). AIP Publishing.
- [3]. Ibrahim, G., & Hamni, A. (2019). Analisis Kekasaran Permukaan dan Diameter Pada Pemesinan Drill Paduan Magnesium Menggunakan Metode Taguchi. *Machine; Jurnal Teknik Mesin* Vol. 5 No. 1, April 2019.
- [4]. Mufarrih, A. M., Harijono, A., Amrullah, U. S., Qosim, N., & Emzain, Z. F. (2022). Analisa Diameter pada Proses Drilling Material KFRP. *Jurnal Mesin Nusantara*, 5(2), 201-212.
- [5]. Ndaruhadi, P. W., & Santosa, B. (2015). Akurasi Lubang Bor Hasil Proses Pengeboran Pada Material SKD-11. *Prosiding SNIJA*, 191-195.
- [6]. Verma, R. K., Singh, V. K., Singh, D. K., & Kharwar, P. K. (2021). Experimental investigation on surface roughness and diameter error during drilling of polymer nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2501-2506.
- [7]. Yanis, M. (2010). Analisis profil diameter untuk menentukan kesalahan geometrik pada pembuatan komponen menggunakan mesin bubut CNC. *Jurnal Rekayasa Sriwijaya*, 19(1), 50-58.