

**OPTIMASI KEAUSAN PAHAT BOR HSS MELALUI EMISI AKUSTIK
PADA PENGEBORAN KERING SS316L MENGGUNAKAN METODE
TAGUCHI GREY RELATIONAL ANALYSIS**

TESIS

Oleh

DIAN RIZKI FAUZI

NPM 2325021005



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**OPTIMASI KEAUSAN PAHAT BOR HSS MELALUI EMISI AKUSTIK
PADA PENGEBORAN KERING SS316L MENGGUNAKAN METODE
TAGUCHI GREY RELATIONAL ANALYSIS**

TESIS

Oleh

DIAN RIZKI FAUZI

NPM 2325021005

**Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Magister
Pada Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

OPTIMASI KEAUSAN PAHAT BOR HSS MELALUI EMISI AKUSTIK PADA PENGEBORAN KERING SS316L MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GREY RELATIONAL ANALYSIS

Dian Rizki Fauzi

Proses pengeboran merupakan tahapan untuk membentuk lubang berbentuk silinder dengan menggunakan mata bor. Pemilihan dan pengaturan parameter pemotongan yang kurang tepat dapat menyebabkan hasil geometri komponen menjadi tidak presisi serta mempercepat keausan pada mata bor. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan kombinasi parameter pengeboran yang paling optimal untuk meminimalkan dua variabel respon utama, yaitu jumlah lubang dan nilai frekuensi. Eksperimen dilakukan pada material Stainless Steel 316L dengan batas keausan pahat (VB) sebesar 0,2 mm. Rancangan percobaan menggunakan matriks ortogonal L9, dengan variabel bebas berupa diameter pahat, kecepatan spindel, kecepatan pemakanan (feeding), dan sudut ujung pahat, masing-masing terdiri dari tiga level, serta dilakukan dua kali replikasi. Analisis *Grey Relational Analysis* (GRA) digunakan untuk mengoptimalkan karakteristik multirespon, dimana jumlah lubang yang lebih banyak dianggap lebih baik, sementara nilai frekuensi yang lebih rendah dianggap lebih unggul. Variasi parameter meliputi diameter pahat 4 mm, 6 mm, dan 8 mm; kecepatan spindel 398 rpm, 530 rpm, dan 795 rpm; kecepatan pemakanan 30 mm/menit, 38 mm/menit, dan 46 mm/menit; serta sudut ujung pahat 90°, 118°, dan 135°. Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi terbaik diperoleh pada penggunaan pahat berdiameter 4 mm, kecepatan spindel 530 rpm, kecepatan pemakanan 38 mm/menit, dan sudut ujung pahat 118°. Uji konfirmasi menunjukkan bahwa kombinasi ini menghasilkan jumlah lubang sebanyak 90 lubang dengan nilai frekuensi 0,03648 MHz. Dari hasil penelitian, sudut ujung pahat teridentifikasi sebagai faktor yang paling dominan dengan kontribusi sebesar 47,79% terhadap hasil multirespon.

Kata kunci : Pahat bor HSS, SS316L, Emisi Akustik, Taguchi – Grey Relational Analysis

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF HSS DRILL BIT WEAR THROUGH ACOUSTIC EMISSION IN DRY DRILLING OF SS316L USING THE TAGUCHI GREY RELATIONAL ANALYSIS METHOD

Dian Rizki Fauzi

The drilling process is a machining operation aimed at forming cylindrical holes using a drill bit. Improper selection and adjustment of machining parameters can lead to imprecise component geometry and accelerated tool wear. The purpose of this study is to determine the optimal combination of drilling parameters to minimize two main response variables, namely the number of holes and frequency value. The experiment was conducted on Stainless Steel 316L material with a tool wear limit (VB) of 0.2 mm. The experimental design used an L9 orthogonal array with independent variables including drill bit diameter, spindle speed, feed rate, and point angle each at three levels and was carried out with two replications. The Grey Relational Analysis (GRA) method was employed to optimize the multi-response characteristics, where a higher number of holes is considered better, while a lower frequency value is more desirable. The parameter variations included drill bit diameters of 4 mm, 6 mm, and 8 mm; spindle speeds of 398 rpm, 530 rpm, and 795 rpm; feed rates of 30 mm/min, 38 mm/min, and 46 mm/min; and point angles of 90°, 118°, and 135°. The analysis results showed that the optimal combination was achieved using a 4 mm drill bit diameter, a spindle speed of 530 rpm, a feed rate of 38 mm/min, and a point angle of 118°. The confirmation test indicated that this combination produced 90 holes with a frequency value of 0,03648 MHz. Based on the findings, the point angle was identified as the most influential factor, contributing 47,79% to the multi-response outcome.

Keywords: HSS drill bit, SS316L, Acoustic Emission, Taguchi – Grey Relational Analysis

Judul Tesis

**OPTIMASI KEAUSAN PAHAT BOR HSS
MELALUI EMISI AKUSTIK PADA
PENGEBORAN KERING SS316L
MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI
GREY RELATIONAL ANALYSIS**

Nama Mahasiswa

Dian riski fauzi

Nomor Pokok Mahasiswa

2325021005

Program Studi

Teknik Mesin

Fakultas

Teknik

 **MENYETUJUI**

Komisi Pembimbing

Ketua

Dr. Ir. Yahuar Burhanuddin, M.T.

NIP. 19640506 2000031001

Anggota

Dr. Eng. Suryadiwansa, S.T., M.T.

NIP. 197108171998021003

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

NIP. 197408162000121001

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin

Dr. Harmen, S.T., M.T.

NIP. 196906202000031001

LEMBAR PENGESAHAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.**

Anggota Penguji : **Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.**

Penguji Utama I : **Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.**

Penguji Utama II : **Dr. Eng. Shirley Savetlana, M.Met.**

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910302000031001

3. Direktur Program Pasca Sarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **17 Januari 2026**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis berjudul "*Optimasi Keausan Pahat Bor HSS Melalui Emisi Akustik Pada Pengeboran Kering SS316L Menggunakan Metode Taguchi Grey Relational Analysis*" merupakan hasil karya asli saya sendiri. Saya tidak melakukan penyalinan atau pengambilan karya orang lain dengan cara yang bertentangan dengan kaidah dan etika ilmiah yang berlaku di lingkungan akademik yang dapat dikategorikan sebagai tindakan plagiarisme.

Segala hak kekayaan intelektual atas karya ilmiah ini sepenuhnya menjadi milik Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat pelanggaran atau ketidaksesuaian dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima segala bentuk konsekuensi dan sanksi sesuai dengan ketentuan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 17 Januari 2026

Penulis



Dian Rizki Fauzi
NPM 2325021005

MOTTO

Success needs a process

Kesuksesan itu membutuhkan suatu proses

Eat Failure and you will know the taste of success

Anda tidak akan mengetahui apa itu kesuksesan sebelum merasakan kegagalan

Success is not a final only an achievement

Kesuksesan itu bukanlah akhir segalanya tetapi hanya sebuah pencapaian

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Sakti, pada tanggal 6 Desember 1989, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan bapak Ahmad Suyani dan Ibu Zulfa. Dalam meraih jenjang Perguruan Tinggi penulis melalui pendidikan formal, yaitu :

1. Sekolah Dasar (SD) Gula Putih Mataram, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulus pada tahun 2002.
2. Sekolah Menengah Pertama (SMP) Gula Putih Mataram, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulus pada tahun 2005.
3. Sekolah Menengah Atas (SMA) Sugar Group, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulus pada tahun 2008.
4. Diploma 3 (D3) Politeknik Tunas Garuda, Bandar Mataram, Lampung Tengah, Lampung dan lulus pada tahun 2014.
5. Sarjana Strata 1 (S1) Universitas Bandar Lampung, Bandar Lampung, Lampung dan lulus pada tahun 2021.

Penulis diterima menjadi Mahasiswa Magister Teknik Mesin Universitas Lampung pada tahun 2023 melalui jalur seleksi umum. Dengan ketekunan, motivasi yang tinggi untuk terus belajar, berusaha dan berjuang, penulis telah menyelesaikan penggerjaan Tesis ini. Akhir kata penulis mengucap rasa syukur yang sebesar-besarnya atas terselesaikannya Tesis dengan judul **“OPTIMASI KEAUSAN PAHAT BOR HSS MELALUI EMISI AKUSTIK PADA PENGEBORAN KERING SS316L MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GREY RELATIONAL ANALYSIS”**.

PERSEMBAHAN

Tesis ini penulis persembahkan kepada :

1. Bapak Ahmad Suyani dan Ibu Zulfa, orang tuaku tersayang yang telah memberikan banyak pendidikan dan perhatian selama hidup bersama.
2. Anak Faalfarezi Nareswara Fauzi dan Givania Altafunisa Fauzi, kedua anakku tersayang yang telah banyak memberikan warna kebahagiaan dan suka cita.
3. Ibu Purwati Lee Couhoult selaku pemilik dari Sugar Group Companies yang telah memberikan kesempatan untuk menempuh pendidikan melalui program Beasiswa S2 Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak dan Ibu Dosen Fakultas Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah banyak membantu sehingga tesis ini dapat terselesaikan.
5. Terima kasih kepada bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. dan Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. yang telah banyak meluangkan waktu untuk membimbing Tesis ini.
6. Rekan - rekan Mahasiswa Magister Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan tahun 2023 serta semua pihak yang telah membantu.

Bandar Lampung, 17 Januari 2026

Dian Rizki Fauzi
NPM2325021005

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Universitas Lampung.

Tesis yang berjudul **“OPTIMASI KEAUSAN PAHAT BOR HSS MELALUI EMISI AKUSTIK PADA PENGEBORAN KERING SS316L MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GREY RELATIONAL ANALYSIS”** dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi dalam proses penyusunannya.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis dengan tulus mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi penyempurnaan karya ini. Atas segala perhatian dan bantuannya, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Bandar Lampung, 17 Januari 2026

Penulis,

Dian Rizki Fauzi

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	iii
LEMBAR PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN ORISINALITAS	vii
MOTTO.....	viii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	ix
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian	6
1.4. Batasan Masalah.....	6
1.5. Sistematika Penulisan.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1. Proses Pengeboran	8
2.2. <i>High Speed Steel</i> (HSS)	9
2.3. Parameter Pemesinan	9
2.4. Keausan Alat Potong	10
2.5. Pemantauan Kondisi Keausan Alat Potong.....	15

2.6.	<i>Mesin Milling CNC</i>	16
2.7.	<i>Drilling Cycle Spot Drilling (G81)</i>	18
2.8.	Pahat Gurdi atau Mata Bor.....	18
2.9.	Keausan Mata Bor.....	19
2.10.	Metode Taguchi	21
2.11.	<i>Grey Relational Analysis (GRA)</i>	24
2.12.	Langkah Pendekatan <i>Grey Relational Analysis (GRA)</i>	25
2.13.	<i>Analysis of Variance (ANOVA)</i>	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		31
3.1.	Tempat Penelitian.....	31
3.2.	Variabel Penelitian	31
3.2.1.	Variabel Independen/Proses.....	31
3.2.2.	Variabel Respon	32
3.3.	Bahan dan Alat Penelitian.....	32
3.3.1.	Bahan Eksperimen	32
3.3.2.	Alat penelitian	33
3.4.	Rancangan Percobaan	42
3.4.1.	Pengaturan Variabel pada Mesin Milling CNC	42
3.4.2.	Prosedur Pelaksanaan Percobaan	46
3.5.	Pengukuran dan Pengambilan Data	47
3.5.1.	Pengambilan Data Keausan Pahat.....	47
3.5.2.	Pengambilan Data Frekuensi.....	48
3.6.	Tahap Analisa Data.....	48
3.7.	Metode <i>Least Square</i>	49

3.8. Diagram Alir Penelitian	52
BAB IV PEMBAHASAN.....	54
4.1. Hasil Pengujian	54
4.2. Mencari SN <i>Ratio</i> dan ANOVA Tiap Faktor.....	54
4.3. Analisis Multirespon Dengan Metode Taguci - GRA.....	82
4.3.1. Normalisasi SNR.....	83
4.3.2. Mencari Nilai <i>Delta</i> dan <i>Grey Relational Coefficient</i> (GRC).....	84
4.3.3. <i>Grey Relational Grade</i> (GRG).....	84
4.3.4. Optimasi Nilai GRG.....	85
4.3.5. ANOVA Terhadap GRG.....	87
4.4. Pengujian Konfirmasi.....	89
4.5. Pembahasan Hasil Perhitungan Dengan Metode <i>Grey Relational Analysis</i> (GRA)	90
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	92
5.1. Kesimpulan	92
5.2. Saran.....	93
DAFTAR PUSTAKA	94
LAMPIRAN	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1. Dua Jenis Pengeboran (a) Pengeboran Tembus (Through Hole), (b) Pengeboran Tidak Tembus (Blind Hole)	8
Gambar 2.2. Keausan pada End Mill dan Slot Drill (ISO 8688-2,1989).....	14
Gambar 2.3. Keausan Tepi (VB) (Kalpakjian, 2014)	14
Gambar 2.4. Kaidah Tangan Kanan.....	17
Gambar 2.5. Drilling Cycle Spot Drilling (G81)	18
Gambar 2.6. Bagian-Bagian Pahat Twist Drill	19
Gambar 3.1. Material SS316L Tebal 6 mm	32
Gambar 3.2. Mesin Milling CNC Merk GUT VMC 930E	34
Gambar 3.3. Pahat Twist Drill HSS Diameter 4 mm, 6 mm dan 8 mm.....	34
Gambar 3.4. Kamera USB Dino-Lite.....	35
Gambar 3.5. Acoustic Emission Sensor PXR15	36
Gambar 3.6. Pre-Amplifier	37
Gambar 3.7. Osiloskop Digital 2 Channel	38
Gambar 3.8. Power Supply	39
Gambar 3.9. Kabel BNC to BNC.....	40
Gambar 3.10. Stand Magnetic Fine Adjuster.....	40
Gambar 3.11. <i>Experimental Set-up</i>	41
Gambar 3.12. Panjang Pemotongan (L) pada Masing-Masing Run Order	44
Gambar 3.13. Pengukuran Keausan Tepi Pahat.....	47
Gambar 3.14. Diagram Alir Penelitian	53

Gambar 4.1. Main Effect Plot untuk SNR Jumlah Lubang	56
Gambar 4.2. Main Effect Plot untuk SNR Frekuensi	57
Gambar 4.3. Perhitungan Anova Terhadap Respon Jumlah Lubang	59
Gambar 4.4. Perhitungan Anova Terhadap Respon Frekuensi	60
Gambar 4.5. Grafik Panjang Pemotongan vs Run Order	63
Gambar 4.6. Grafik Waktu Pemesinan vs Run Order	64
Gambar 4.7. Grafik Jumlah Lubang vs Run Order	65
Gambar 4.8. Grafik Frekuensi vs Run Order	66
Gambar 4.9. Grafik Keausan terhadap Waktu Pemotongan	67
Gambar 4.10. Grafik Keausan terhadap Waktu Pemotongan Run Order 1 – 3	68
Gambar 4.11. Grafik Keausan terhadap Waktu Pemotongan Run Order 4 - 6.....	69
Gambar 4.12. Grafik Keausan terhadap Waktu Pemotongan Run Order 7 - 9.....	70
Gambar 4.13. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 1	72
Gambar 4.14. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 2	73
Gambar 4.15. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 3	74
Gambar 4.16. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 4	75
Gambar 4.17. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 5	76
Gambar 4.18. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 6	77

Gambar 4.19. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 7	79
Gambar 4.20. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 8	80
Gambar 4.21. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 9	81
Gambar 4.22. Perhitungan Anova Terhadap Grey Relational Grade (GRG)	88
Gambar 4.23. Grafik Pengukuran Frekuensi (kHz) Terhadap Waktu Pemotongan (menit) Run Order 10	90

DAFTAR TABEL

Halaman		
	Halaman	
11	.....	Tabel 2.1. Jenis Keausan Alat Potong.....
17	.....	Tabel 2.2. Perbandingan Antara Mesin Konvensional dan Mesin CNC.....
28	.....	Tabel 2.3. ANOVA untuk empat faktor dan 3 level
33	.....	Tabel 3.1. Komposisi SS316L
36	.....	Tabel 3.2. Spesifikasi Acoustic Emission Sensor PXR15
37	.....	Tabel 3.3. Spesifikasi Pre-Amplifier.....
38	.....	Tabel 3.4. Spesifikasi Osiloskop Digital 2 Channel
39	.....	Tabel 3.5. Spesifikasi Power Supply.....
42	.....	Tabel 3.6. Run Order Penelitian.....
43	.....	Tabel 3.7. Urutan Percobaan.....
43	.....	Tabel 3.8. Nilai Tiap Faktor.....
45	.....	Tabel 3.9. Tabel Rancangan Percobaan Taguchi L9.....
54	.....	Tabel 4.1. Data Hasil Percobaan
55	.....	Tabel 4.2. Data SNR (Signal-to-Noise Ratio) Jumlah Lubang dan Frekuensi
58	.....	Tabel 4.3. Faktor Optimal Masing-Masing Respon.....
59	.....	Tabel 4.4. Persentase Kontribusi Tiap Faktor Terhadap Jumlah Lubang
60	.....	Tabel 4.5. Persentase Kontribusi Tiap Faktor Terhadap Frekuensi
61	.....	Tabel 4.6. Hasil Optimasi SNR dan ANOVA
83	.....	Tabel 4.7. Data Normalisasi Terhadap Nilai S/N Rasio
84	.....	Tabel 4.8. Data Perhitungan Delta dan Grey Relational Coefficient (GRC)
85	.....	Tabel 4.9. Data Nilai Grey Relational Grade (GRG).....

Tabel 4.10. Nilai Rata-Rata GRG Tiap Faktor	86
Tabel 4.11. Hasil Pengujian Konfirmasi	89
Tabel 4.12. Rangkuman Hasil Metode Taguchi dan Metode GRA	91

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sebagian besar proses manufaktur logam dilakukan melalui pemesinan, dimana material dipotong sesuai rancangan menggunakan pahat potong. Pemilihan pahat potong yang memiliki ketahanan dan kekuatan tinggi berperan penting dalam meningkatkan efisiensi waktu pemesinan serta memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan.

Selama proses pemesinan berlangsung, pahat potong akan mengalami keausan akibat interaksi langsung dengan material benda kerja. Fenomena ini tidak dapat dihindari karena proses pemotongan melibatkan deformasi plastis dan gesekan yang menimbulkan panas, yang pada akhirnya dapat mengubah struktur makro maupun mikro dari material pahat. Keausan tersebut dapat diidentifikasi melalui perubahan bentuk geometri pahat potong (Hassan et al., 2023).

Kondisi pahat yang aus berdampak negatif terhadap proses pemesinan, terutama pada mesin berbasis *Computer Numerical Control* (CNC) yang digunakan untuk produksi massal dengan tingkat presisi tinggi. Oleh karena itu, pemantauan kondisi pahat atau *Tool Condition Monitoring* (TCM) menjadi hal yang krusial untuk mencegah kerugian akibat penurunan performa pahat. Melalui TCM, tanda-tanda atau sinyal keausan pahat dapat terdeteksi lebih awal sehingga kinerja mesin tetap optimal serta kualitas permukaan benda kerja dapat terjaga. Keausan pahat yang tidak terpantau dapat menyebabkan penyimpangan ukuran, meningkatnya

kekasaran permukaan, getaran berlebih, perubahan arus listrik, hingga cacat produk.

Pemantauan kondisi pahat potong umumnya dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu secara langsung (*direct monitoring*) dan tidak langsung (*indirect monitoring*). Pemantauan tidak langsung dilakukan melalui pengukuran parameter seperti gaya potong, getaran, frekuensi, dan arus listrik, sedangkan pemantauan langsung meliputi pengamatan visual dan pengukuran dimensi. Salah satu metode umum untuk menilai keausan pahat adalah inspeksi visual.

Beberapa penelitian sebelumnya telah berkontribusi pada pengembangan sistem inspeksi visual. Salah satunya adalah penelitian oleh Kim (2002) memperkenalkan sistem pengukuran keausan berbasis kamera CCD (*Charge Coupled Device*) dengan jig khusus untuk memantau keausan pahat secara akurat, serta memperkenalkan Metode Taguchi. (Schmitt et al., 2012) mengembangkan sistem inspeksi keausan otomatis yang terbukti akurat dan andal melalui pengujian pada alat potong nyata.

Metode tidak langsung (*Indirect Method*) pada umumnya menghubungkan kondisi pahat dengan informasi lain yang diperoleh pada saat proses pemesinan seperti gaya pemotongan, torsi dan daya, suhu pemotongan, getaran dan emisi akustik (Houshmand et al, 1995). Metode emisi akustik sudah lama diteliti penggunaanya untuk pemantauan kondisi pahat ketika pengeboran baja. (Patra, 2011) menegaskan kembali penerapan sensor AE sebagai sarana efektif untuk memantau keausan bor. Hasil ini juga membentarkan perlunya penggunaan salah satu metode paling maju dalam teknik pemrosesan sinyal, yaitu transformasi paket wavelet untuk ekstraksi fitur dari sinyal emisi akustik.

Dalam penelitiannya (Mohamed, 2014) mengusulkan model identifikasi *chatter* pada proses pemesinan *face milling* berdasarkan data emisi akustik untuk sistem pemantauan alat. Model *Deep Neural Network* (DNN) dikembangkan menggunakan berbagai kerangka kerja *deep learning* untuk mendeteksi *chatter*. Pendekatan model ini menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data eksperimen, dengan tingkat kesalahan 4%. Kesimpulannya, model identifikasi *chatter* berbasis DNN berhasil dikembangkan untuk aplikasi proses milling, yang penting untuk deteksi anomali selama pemesinan serta dapat memberikan rekomendasi parameter pemesinan yang lebih baik.

Penelitian (Fikri et al., 2014) menggunakan mikrofon untuk menangkap *audible sound signal* dari pemotongan di permesinan dapat dilakukan *online monitoring* kondisi keausan cutting tool. Metode ini cukup terjangkau untuk di aplikasikan secara luas. Dengan menggunakan sinyal pada *time domain* dan *frequency domain* mengamati dan membedakan keausan yang terjadi pada cutting tool akan menjadi lebih mudah. Untuk pengembangan lebih lanjut nilai dan ciri khusus pada tiap keausan cutting tool dapat digunakan sebagai penunjang pembuatan sistem pengambil keputusan. Hasil dari sistem tersebut akan memudahkan pengguna mesin untuk mendeteksi bagaimana kondisi keausan dari *cutting tool*.

Penelitian (Pawel Twardowski, 2021) berfokus pada pemantauan kondisi tepi pahat menggunakan sinyal emisi akustik (AE). Kondisi tepi pahat ditentukan oleh lebar keausan pada permukaan sisi, dengan material yang diproses berupa komposit aluminium-keramik yang mengandung 10% SiC. Pahat yang digunakan adalah pemotong frais karbida berlapis berlian. Berdasarkan sinyal AE, langkah-langkah

khusus dikembangkan untuk menghubungkan sinyal tersebut dengan kondisi tepi pahat. Metode penelitian pada mesin diterapkan untuk menilai tingkat keausan pemotong frais dengan menggunakan sinyal AE. Pendekatan yang menggunakan sistem ini menghasilkan kesalahan prediksi kondisi pahat dengan nilai di bawah 6%.

Dalam pemesinan, baja merupakan material yang paling sering digunakan, baik baja perkakas maupun baja paduan. Pada penelitian ini digunakan baja tahan karat tipe Stainless Steel 316L (SS316L), yang mengandung unsur kromium (Cr) sebesar 16–18%. Kandungan krom ini memberikan ketahanan tinggi terhadap korosi sehingga cocok untuk produk implan atau produk otomotif. Salah produk implan yang banyak digunakan yaitu plat tulang (plat ortopedi). Plat tulang ini memerlukan proses pemesinan bor dan frais untuk membuat lubang-lubang baut tulang.

Beberapa penelitian sebelumnya juga, Bhole et al. (2016) meneliti proses pengeboran SS316L dan menyimpulkan bahwa pendekatan Taguchi efektif dalam memperoleh kekasaran permukaan minimum, dengan faktor paling berpengaruh adalah laju pemakanan (*feed rate*).

Rao et al. (2021) mengombinasikan Metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis (GRA)* untuk mengoptimalkan keausan sisi bor dan kekasaran permukaan. Hasilnya menunjukkan parameter optimum pada kecepatan spindle 1200 rpm, *feed* 0,2 mm/rev, dan diameter bor 6 mm. Analisis ANOVA mengindikasikan bahwa diameter bor memiliki pengaruh terbesar (46,97%), diikuti *feed rate* (20,37%) dan kecepatan spindle (16,10%).

Dari berbagai studi tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai hubungan antara parameter pemesinan dan respon hasil pemesinan telah banyak dilakukan, baik dengan pendekatan *single response* maupun *multi-response*. Pendekatan optimasi multi-respon memiliki nilai penting dalam industri manufaktur, karena memungkinkan penentuan kombinasi parameter terbaik hanya melalui satu set percobaan (Wibowo et al., 2022).

Mengingat pentingnya proses pengeboran pada pembuatan plat tulang maka perlu adanya penelitian pemantauan keausan pahat yang lebih aplikatif secara tidak langsung (*indirect method*). Penelitian ini sendiri bertujuan untuk memantau tingkat keausan pahat *twist drill* pada proses pengeboran material SS316L. Pemantauan dilakukan menggunakan kamera USB yang dipasang pada jig khusus, dengan variabel pengamatan utama berupa jumlah lubang dan frekuensi maksimum emisi akustik. Perkembangan sinyal AE dimonitor untuk mengamati perkembangan keausan pada setiap tahap keausan pahat yang akan disandingkan dengan keausan pahat hasil citra kamera hingga mencapai batas keausan maksimum ($VB_{max} = 0,2$ mm). Metode Taguchi dan Grey Relational Analysis (GRA) digunakan untuk menentukan kondisi optimal dan klasifikasi keausan pahat (Pramono et al., 2024).

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menentukan kondisi optimal pada proses pengeboran SS316L dengan mempertimbangkan dua respon utama, yaitu jumlah lubang dan frekuensi emisi akustik. Parameter yang diamati meliputi diameter pahat, kecepatan spindel, kecepatan pemakanan, dan sudut ujung pahat. Kombinasi Metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis (GRA)* digunakan untuk memperoleh kondisi optimum yang menghasilkan jumlah lubang maksimum dengan nilai frekuensi minimum.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh berbagai faktor dan parameter pemesinan terhadap variabel respon waktu pemesinan dan nilai frekuensi dengan menggunakan Metode Taguchi?
2. Bagaimana menentukan kombinasi faktor dan parameter pemesinan yang paling optimal untuk menghasilkan waktu pemesinan dan nilai frekuensi terbaik secara simultan melalui penerapan Metode Taguchi – *Grey Relational Analysis (GRA)*?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun secara khusus tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh berbagai faktor dan parameter pemesinan terhadap dua variabel respon, yaitu waktu pemesinan dan nilai frekuensi dengan menggunakan Metode Taguchi.
2. Menentukan kombinasi faktor dan parameter pemesinan yang paling optimal untuk memperoleh hasil terbaik dari kedua respon tersebut secara simultan melalui penerapan Metode Taguchi – *Grey Relational Analysis (GRA)*.

1.4. Batasan Masalah

1. Pemesinan akan dilakukan pada kondisi pemesinan kering (*dry machining*).
2. Material benda kerja yang digunakan adalah *Stainless Steel 316 L*.
3. Pahat yang dipakai HSS merk Nachi dengan diameter pahat 4 mm, 6 mm dan 8 mm.

4. Kecepatan spindle yang dipakai adalah 398 rpm, 530 rpm dan 795 rpm.
5. Feeding yang dipakai adalah 30 mm/menit, 38 mm/menit dan 46 mm/menit.
6. Sudut ujung pahat adalah 90° , 118° dan 135° .

1.5. Sistematika Penulisan

1. Pendahuluan

Pada bagian ini dijelaskan secara singkat terkait dengan Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Batasan Masalah dan Sistematika Penulisan.

2. Landasan Teori

Pada bagian ini berisi terkait dengan teori dasar Pemesinan, Proses *Drilling*, *Stainless Steel 316L*, Keausan Pahat, Metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis* (GRA).

3. Metodologi Penelitian

Pada bagian ini berisi terkait dengan Tempat Penelitian, Bahan, Peralatan, Desain Eksperimen, Penentuan Faktor dan Level, Pengambilan Data Pengujian, Pengolahan Data dan Diagram Alir Penelitian.

4. Hasil Dan Pembahasan

Pada bagian ini menjelaskan data hasil pengujian, Mencari *SN Ratio* dan Anova Tiap Faktor, Analisis Multirespon dengan Metode Taguchi, Pengujian Konfirmasi dan Pembahasan hasil Perhitungan dengan metode metode *Grey Relational Analysis* (GRA).

5. Kesimpulan Dan Saran

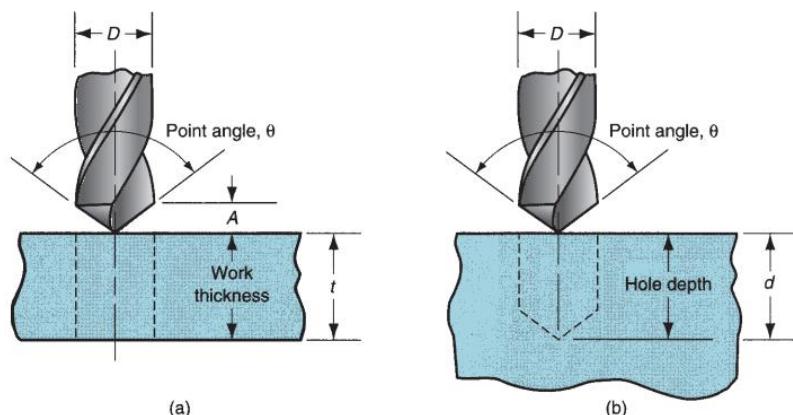
Pada bagian ini menjelaskan kesimpulan dari bab sebelumnya dan memberikan saran untuk penelitian yang akan dilaksanakan selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Proses Pengeboran

Drilling atau pengeboran adalah operasi pemesinan yang digunakan untuk membuat lubang bulat pada benda kerja. Sedangkan *boring*, merupakan pemesinan yang digunakan untuk memperbesar lubang yang sudah ada. Pengeboran biasanya dilakukan dengan alat potong berupa *twist drill*. Ada 2 jenis pengeboran yaitu pengeboran tembus dan pengeboran tidak tembus, dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Dua Jenis Pengeboran (a) Pengeboran Tembus (Through Hole),
(b) Pengeboran Tidak Tembus (Blind Hole)

Sumber : Groover (2010)

Pengeboran dapat dikategorikan *double edge cutting*, sebagaimana digunakan untuk membuat lubang dengan cara alat potong berputar kemudian terdapat langkah *feeding* yang dijalankan sehingga terjadi proses pemotongan material. Besar dimensi lubang sesuai dengan diameter *twist drill* yang digunakan.

2.2. *High Speed Steel (HSS)*

Baja kecepatan tinggi (HSS) adalah baja dengan komposisi metalurgi yang terdiri dari 1,9% Karbon, 0,3% Mangan, 8% Tungsten dan 3,8% Kromium dengan sisanya Besi. Namun pada tahun 1970, pemrosesan metalurgi serbuk metalurgi dengan pengepresan statis panas atau *Hot Isostatic Pressing (HIP)* menghasilkan matriks unsur yang terdistribusi secara merata, untuk mengatasi kemungkinan pemisahan dan menghasilkan struktur tidak homogen yang biasanya ditemukan dalam penempaan HSS. Teknik pemrosesan ini memungkinkan pahat HSS sinter/tempa yang baru dikembangkan dapat mendekati kinerja cemented carbide dalam hal ketahanan aus, kekerasan, dan ketangguhan.

2.3. Parameter Pemesinan

Dalam proses pemesinan ada 3 parameter yang penting untuk diperhatikan dalam pelaksanaannya. Adapun parameter yang dimaksud ialah kecepatan potong (*cutting speed*), kecepatan pemakanan (*feeding*) dan kedalaman pemakanan (*depth of cut*). Kombinasi yang tepat dari ketiga variabel ini akan mendapatkan proses pemesinan yang baik.

Kecepatan potong ialah kecepatan alat potong dalam melakukan pemotongan dalam jarak tertentu yang dapat dinyatakan dalam m/menit. Putaran mesin atau rotasi mesin sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong ini, semakin tinggi nilai kecepatan potong maka rotasi mesin semakin tinggi juga. Kecepatan pemakanan ialah jarak yang ditempuh alat potong ke arah gerakan pemakanan (tegak lurus terhadap vektor kecepatan potong) dengan satuan mm/menit. *Feeding (Vf)* merupakan jarak pemotong bergerak dengan satuan mm/min, sering digunakan saat benda kerja tidak berputar (misalnya proses milling). Kedalaman potong (d) adalah

jarak alat potong menembus benda kerja dan dinyatakan dalam milimeter (mm). Ketiga parameter ini secara langsung mempengaruhi gaya potong, daya potong, suhu, jenis chip, permukaan akhir, umur pahat dan waktu pemotongan. Misalnya, meningkatkan *feeding* atau kedalaman potong menjadi lebih besar akan meningkatkan ketebalan chip yang kemudian membutuhkan lebih banyak gaya/daya potong. Menggunakan kecepatan pemotongan yang lebih tinggi mengurangi waktu pemotongan karena meningkatkan jumlah material yang dipindahkan dalam waktu tertentu menjadi besar (Material Removal Rate, MRR) akan tetapi umur pakai alat potong menjadi lebih pendek.

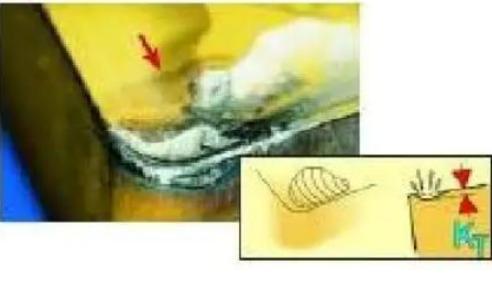
2.4. Keausan Alat Potong

Pada dasarnya alat potong yang digunakan secara terus menerus maka akan mengalami penurunan kinerjanya, ditandai dengan keausan yang mulai muncul. Pengaruh alat potong yang aus tentu sangat mempengaruhi kinerja pemesinan, menimbulkan masalah yang tidak dikehendaki. Berdasarkan standar ISO-8688-1/1989, kriteria tes akhir ditetapkan ketika rata-rata keausan pahat mencapai 0,3 – 0,8 mm untuk mata pahat HSS dan 0,2 – 0,6 mm untuk mata pahat karbida.

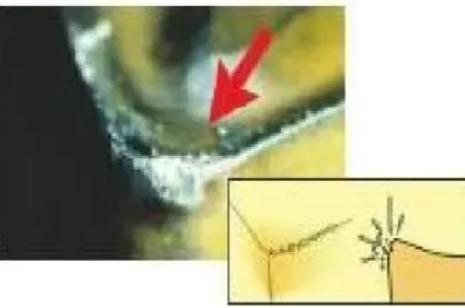
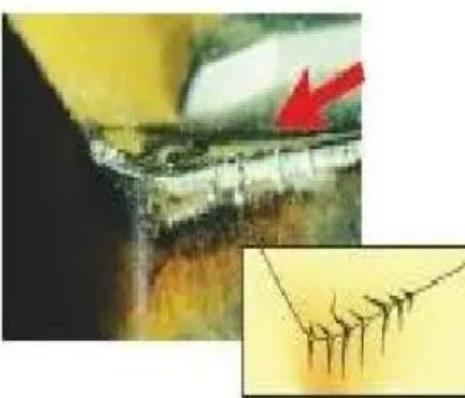
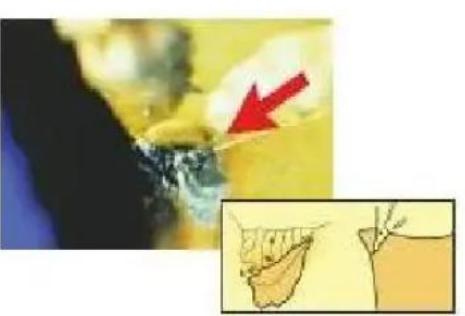
Keausan yang terjadi pada alat potong dapat dikelompokkan dalam beberapa jenis yaitu keausan kawah (*crater wear*), keausan tepi (*flank wear*), *notch wear*, *thermal cracking*, *chipping*, deformasi plastik (*plastic deformation*). Di antara mekanisme keausan tersebut, hanya keausan tepi yang paling banyak digunakan.

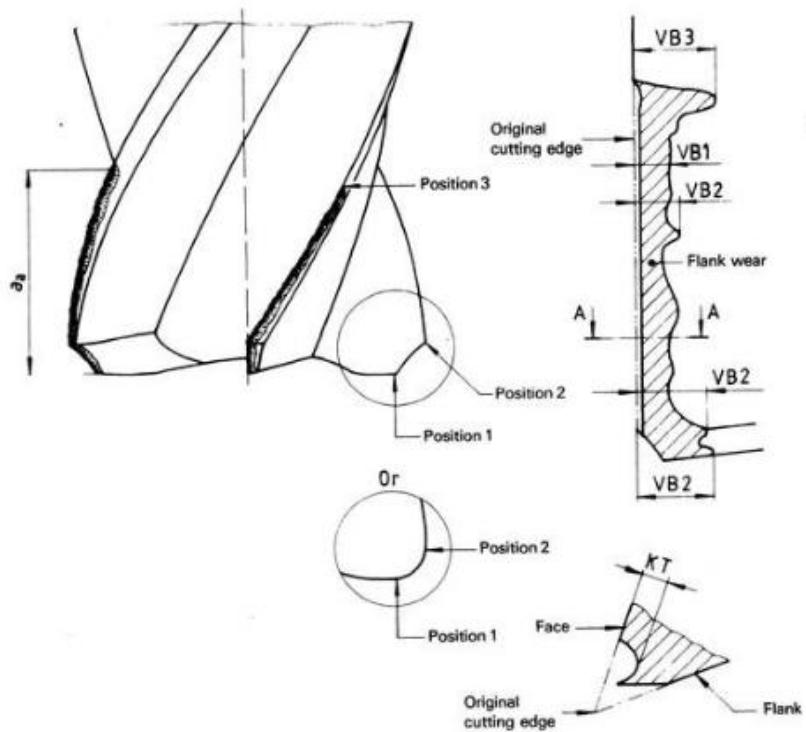
Macam-macam keausan yang sering terjadi pada alat potong dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 2.1. Jenis Keausan Alat Potong

Jenis Keausan Alat Potong	Keterangan
<p>1. <i>Flank Wear</i></p> 	<p>Timbulnya <i>flank wear</i> akan menyebabkan produk memiliki kekasaran permukaan yang jelek atau dapat juga menyebabkan dimensi yang dihasilkan keluar dari toleransi.</p>
<p>2. <i>Notch Wear</i></p> 	<p><i>Notch wear</i> atau keausan yang berbentuk takik akan menyebabkan produk memiliki kekasaran permukaan yang jelek atau dapat juga menyebabkan dimensi yang dihasilkan keluar dari toleransi.</p>
<p>3. <i>Crater Wear</i></p> 	<p><i>Crater wear</i> atau terjadinya keausan hingga timbul lekukan atau kawah yang menyebabkan produk memiliki kekasaran permukaan yang jelek atau dapat juga menyebabkan dimensi yang dihasilkan keluar dari toleransi.</p> <p><i>Crater wear</i> dapat juga menyebabkan kerusakan pada insert.</p>

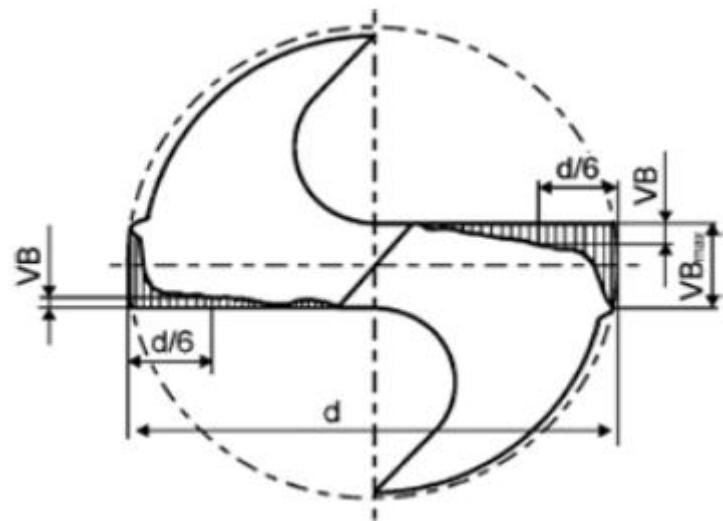
<p>4. <i>Plastic Deformation</i></p> 	<p><i>Plastic deformation</i> atau <i>permanent deformation</i> pada alat potong terjadi saat pemotongan logam dengan tekanan dan temperatur yang ekstrim serta kontak alat potong dengan benda kerja yang intens. Deformasi plastis disebut juga deformasi termal. Deformasi plastis dapat berupa <i>Edge Depression</i> atau <i>Flank Impression</i>. Kerusakan insert jenis ini akan menyebabkan <i>chip control</i> dan kekerasan permukaan produk yang jelek.</p>
<p>5. <i>Built Up Edge (BUE)</i></p> 	<p><i>Built Up Edge (BUE)</i> terjadi ketika serpihan dari benda kerja menempel karena adanya tekanan dan temperatur tinggi pada sisi potong insert. Selain menyebabkan penumpukan material pada insert, BUE pada tahapan berikutnya dapat juga mengakibatkan insert mengalami sumpil atau <i>chipping</i> serta mempercepat terjadinya <i>flank wear</i>.</p>

<p>6. <i>Chip Hammering</i></p> 	<p>Kerusakan insert akibar <i>chip hammering</i> ditandai oleh kerusakan <i>rake face</i> dari insert sebagai akibat dari proses penyayatan dengan tatal yang terlalu panjang dan konstan.</p>
<p>7. <i>Frittering</i></p> 	<p>Kerusakan insert akibat <i>frittering</i> menyebabkan hasil permukaan akhir penyayatan yang jelek (<i>poor surface finish</i>) serta dapat menimbulkan <i>flank wear</i> yang berlebihan.</p>
<p>8. <i>Thermal Cracks</i></p> 	<p>Kerusakan insert <i>thermal cracks</i> dapat menyebabkan <i>frittering</i> dan hasil permukaan akhir penyayatan yang jelek (<i>poor surface finish</i>). Retakan kecil yang timbul pada posisi tegak lurus (<i>perpendicular</i>) terhadap sisi potong dari insert.</p>
<p>9. <i>Insert Breakage</i></p> 	<p>Kerusakan <i>insert breakage</i> bukan hanya dapat menyebabkan kerusakan pada insert saja namun dapat juga menyebabkan kerusakan pada <i>shim</i> dan benda kerja.</p>



Gambar 2.2. Keausan pada End Mill dan Slot Drill (ISO 8688-2,1989)

(Lubis et al., 2021)



Gambar 2.3. Keausan Tepi (VB) (Kalpakjian, 2014)

2.5. Pemantauan Kondisi Keausan Alat Potong

Keausan pahat pasti secara langsung memengaruhi hasil akhir dan akurasi dimensi benda kerja yang telah selesai. Mempertahankan hasil produk yang baik serta akurasi dimensi yang konsisten tentu perlu alat potong yang selalu dalam kondisi yang baik. Jika tidak dipantau dengan baik, kondisi alat potong maka akan terjadi waktu henti/*downtime* mesin tanpa direncanakan akibat kerusakan alat dan produk yang sebagai akibat kerusakan alat potong yang tidak terpantau. Secara ekonomi juga akan menaikkan biaya produksi karena waktu yang hilang akan menyebabkan waktu produksi menjadi lebih lama sehingga produktivitas turun.

Pemantauan keausan alat potong (TCM) dapat dilakukan secara langsung maupun tidak langsung. Dalam metode langsung, keausan pahat aktual diukur dan dipantau secara langsung dalam hal kehilangan material dengan sensor optik maupun *laser*, yang dianggap sebagai metode yang sangat akurat dan handal (Jang et al., 2023). Metode ini sangat mahal dan tidak praktis dalam pelaksanaannya di dalam pabrik karena pengukuran secara *offline* atau siklus waktu tertentu yang dapat menimbulkan *downtime* mesin. Sebaliknya, metode tidak langsung berdasarkan kondisi inferensi dari output sensor tidak langsung lebih menguntungkan untuk digunakan karena lebih hemat biaya, efisien, lebih mudah digunakan dan masih dapat digunakan untuk pemantauan online meskipun akurasi lebih rendah (Jantunen, 2002).

Sistem produksi semakin banyak menggunakan proses pemesinan otomatis sehingga perlu dikembangkan sistem pemantauan yang lebih handal dan efisien. Akibatnya, permintaan untuk sistem pemantauan kondisi alat meningkat karena dalam dunia industri berusaha meminimalkan konsekuensi cacat, meningkatkan

kualitas, keamanan dan keandalan produk. Untuk mencapai prediksi dan estimasi keausan pahat yang andal dalam proses pemesinan, lebih dari satu teknologi sensor yang dikenal sebagai gabungan sensor telah dikembangkan untuk memantau keausan pahat. Untuk meningkatkan keandalan sensor dan sistem pemantauan, lebih baik menggunakan beberapa sinyal sensor daripada hanya satu sinyal sensor (Safizadeh & Latifi, 2014).

Akibatnya, memperoleh sinyal sensor untuk proses pemesinan membutuhkan sistem akuisisi data yang terdiri dari beberapa sensor dan membutuhkan komputer berkinerja tinggi untuk menghubungkan sensor tersebut, akuisisi data, pemrosesan data dan kontrol mesin. Hal ini dapat dicapai karena sistem komputer dan perangkat lunak juga dirancang untuk memenuhi kebutuhan penyimpanan data yang besar untuk analisis data yang lebih cepat dan lebih efisien.

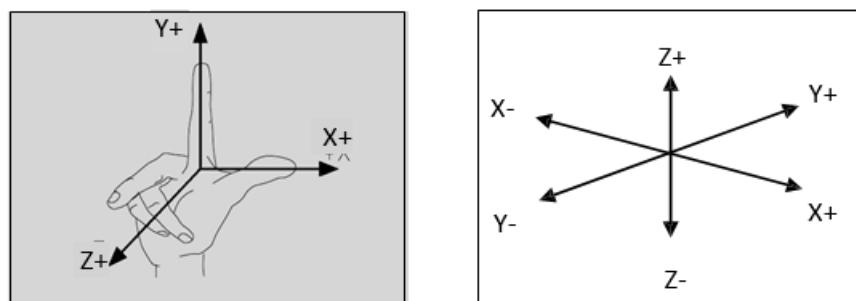
2.6. Mesin *Milling CNC*

CNC (Computer Numerically Controlled) merupakan istilah yang digunakan untuk menunjukkan bahwa suatu peralatan manufaktur (bubut, milling, dll) yang dikontrol secara numerik untuk mengoperasikannya. Mesin CNC sendiri adalah mesin perkakas yang dilengkapi dengan sistem mekanik dan kontrol berbasis komputer yang mampu membaca instruksi kode N, G, F, T, dan lain-lain, dimana kode-kode tersebut akan menginstruksikan ke mesin CNC agar bekerja sesuai dengan program benda kerja yang akan dibuat. Secara umum cara kerja mesin perkakas CNC tidak berbeda dengan mesin perkakas konvensional.

Tabel 2.2. Perbandingan Antara Mesin Konvensional dan Mesin CNC

Pembanding	Mesin Konvensional	Mesin CNC
Proses permesinan	Pengerjaan manual	Sistem otomasi
Komplektivitas benda kerja	Kurang efektif untuk mengerjakan benda kerja yang mempunyai kontur yang rumit/kompleks	Efektif untuk mengerjakan benda kerja yang mempunyai kontur yang rumit dan sulit dikerjakan secara manual
Kualitas hasil pengerjaan	Kualitas hasil tergantung operator dan mesin	Kualitas hasil lebih terjaga
Tingkat ketelitian	Cukup	Tinggi (sampai 1/1000 mm)
Kapasitas pengerjaan	Kurang efektif untuk pengerjaan mass production	Efektif untuk pengerjaan produk dalam jumlah banyak (mass production)
Perawatan	Sederhana	Kompleks

Pada mesin-mesin perkakas, poros-poros geraknya orthogonal artinya sumbu X, Y, Z saling tegak lurus, sehingga gerak dari meja dapat diprogram sesuai dengan sumbu-sumbu tegak lurusnya. Sebagai pedoman untuk menentukan arah poros-poros, maka digunakan semacam aturan yang popular dengan sebutan “*kaidah tangan kanan*” (lihat gambar).



Gambar 2.4. Kaidah Tangan Kanan

2.7. *Drilling Cycle Spot Drilling (G81)*

Fungsinya untuk proses *drilling* yang normal. Alat potong akan turun sampai kedalaman pemakanan yang sudah ditentukan dengan kecepatan potong tertentu dan akan kembali setelah kedalaman tercapai.

NC Blocks : **G98 (G99) G81 X... Y... Z... R... F... K...**

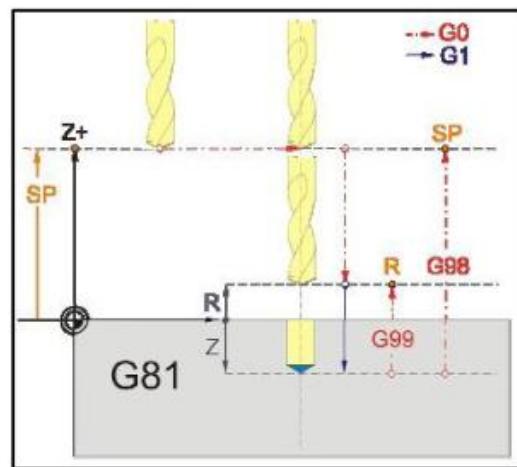
X, Y Posisi koordinat lubang

Z Kedalaman pemakanan absolute

R Jarak pembebasan absolute

F Feedrate

K Jumlah pengulangan (hanya jika pakai G91)

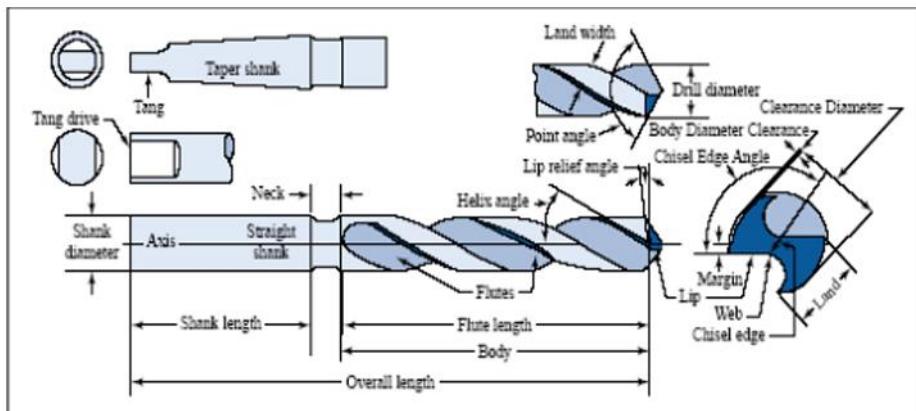


Gambar 2.5. *Drilling Cycle Spot Drilling (G81)*

2.8. **Pahat Gurdi atau Mata Bor**

Pahat gurdi atau mata bor adalah sebuah alat potong yang ujungnya berputar (*twist*) yang memiliki sisi potong dan galur yang berhubungan secara berkesinambungan disepanjang badan pahat. Galur dapat berbentuk lurus atau spiral, yang didesain untuk jalan keluarnya geram dan fluida pemotongan. Pada proses gurdi terdapat berbagai tipe pahat yang digunakan. Sebagian besar proses pemesinan gurdi ini menggunakan pahat

gurdi berjenis *twist drill*. Bagian-bagian pahat ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Di antara bagian-bagian pahat tersebut yang paling utama adalah sudut helix (*helix angle*), sudut ujung pahat potong utama (*point angle/lip angle*), dan sudut bebas (*clearance angle*). Gambar di bawah ini menunjukkan bagian-bagian twist drill serta sudut bagian pemotong pada twist drill (Dwijayanti, 2017).



Gambar 2.6. Bagian-Bagian Pahat Twist Drill

2.9. Keausan Mata Bor

Selama proses pemesinan, pahat atau alat potong akan digunakan secara bertahap sampai mencapai akhir masa pakainya. Masa pakai pahat dipengaruhi oleh tingkat keausan pahat atau tool wear. Masa pakai alat sering didefinisikan sebagai periode waktu yang dapat digunakan secara efektif selama alat tersebut masih memenuhi parameter yang ditetapkan. Tingkat keausan alat dipengaruhi oleh faktor-faktor pemesinan seperti kecepatan potong, kedalaman potong, dan laju pemakanan (Hatt, 2016).

Keausan pada pahat terjadi secara perlahan dan umumnya terjadi di area muka dan sisi atas pahat, sehingga keausan pahat dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu *crater wear* dan *flank wear* (Groover, 2002).

Mekanisme yang mengakibatkan keausan pada pahat dalam proses pengefraisan dapat disajikan sebagai berikut:

1. Keausan abrasi : Merupakan tindakan mekanis yang terjadi karena partikel keras dalam bahan kerja menggores dan menghilangkan sebagian kecil dari alat. Abrasi ini terjadi pada keausan sisi datar dan keausan kawah, menjadi penyebab utama keausan sisi datar.
2. Keausan adhesi : terjadi ketika dua logam terpaksa berkontak di bawah tekanan dan suhu tinggi, sehingga terjadi adhesi di antara keduanya. Kondisi ini muncul antara serpihan dan permukaan muka alat. Saat serpihan mengalir di sepanjang alat, partikel kecil lepas dari permukaannya, menyebabkan pengikisan permukaan.
3. Keausan difusi : suatu proses dimana pertukaran atom terjadi di sepanjang batas kontak yang rapat antara dua bahan. Dalam konteks keausan alat, difusi terjadi pada batas alat dan serpihan, menyebabkan permukaan alat kehilangan atom yang berperan atas kekerasannya. Seiring berlanjutnya proses ini, permukaan alat menjadi lebih rentan terhadap abrasi dan adhesi. Difusi dianggap sebagai mekanisme utama keausan kawah.
4. Keausan reaksi kimia : suhu tinggi dan permukaan bersih pada antarmuka alat-serpihan saat proses pengefraisan dengan kecepatan tinggi dapat menyebabkan reaksi kimia, khususnya oksidasi, pada permukaan muka alat. Lapisan yang teroksidasi, yang lebih lunak daripada material asli alat, terlepas, mengungkapkan material baru untuk mendukung proses reaksi.
5. Keausan deformasi plastis : mekanisme lain yang berkontribusi pada keausan alat adalah deformasi plastis pada tepi potong. Gaya potong pada tepi potong

pada suhu tinggi menyebabkan deformasi plastis, membuatnya lebih rentan terhadap abrasi pada permukaan alat. Deformasi plastis utamanya berkontribusi pada keausan sisi datar. Sebagian besar mekanisme keausan alat ini dipercepat pada kecepatan potong dan suhu yang lebih tinggi. Difusi dan reaksi kimia terutama peka terhadap peningkatan suhu (Groover, 2002).

2.10. Metode Taguchi

Metode Taguchi yang diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taguchi merupakan sebuah pendekatan yang terdiri dari tiga tahap penting, yaitu desain sistem, desain parameter, dan desain toleransi. Metode ini memiliki tujuan untuk meningkatkan kualitas produk dengan pendekatan statistik yang sistematis. Dalam konteks proses *drilling*, Metode Taguchi dapat digunakan untuk menentukan kondisi pemotongan yang optimal, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas hasil pemesinan.

Taguchi mengembangkan desain orthogonal array yang unik untuk mempelajari seluruh parameter pengujian dengan jumlah percobaan yang relatif kecil. Data hasil percobaan kemudian diubah menjadi rasio *signal-to-noise* (S/N). Dalam metode ini, rasio S/N digunakan sebagai indikator untuk mengukur penyimpangan sifat kualitas suatu produk dari nilai yang diharapkan. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang efisien dan memberikan wawasan tentang faktor-faktor yang berpengaruh pada kualitas produk secara sistematis.

Taguchi menggunakan ortogonal array dalam metode penelitiannya. Ortogonal array memungkinkan setiap faktor memiliki penilaian yang sama melalui Desain Eksperimen (DOE). Dengan menggunakan metode ini, peneliti dapat mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan sambil tetap memperoleh hasil yang valid dan statistik yang baik. DOE menggunakan Metode Taguchi melibatkan

beberapa langkah yang meliputi pemilihan variabel/faktor independen, penentuan jumlah level dalam setiap variabel independen, pemilihan ortogonal array, dan pemilihan parameter kinerja yang akan diukur. Dengan mengikuti langkah-langkah ini, penelitian dapat dirancang secara efisien dan efektif untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hasil yang diinginkan (Gibson, 2015).

Dalam analisis rasio S/N, terdapat tiga kategori sifat kualitas yang digunakan, yaitu "*smaller the better*", "*larger the better*", dan "*nominal is better*". Taguchi mengemukakan suatu prosedur standar untuk mengoptimalkan parameter proses. Metode ini memungkinkan identifikasi kondisi optimal yang dapat menghasilkan kualitas produk yang lebih baik dengan mengoptimalkan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Dengan menggunakan pendekatan ini, dapat dilakukan pengaturan dan perbaikan parameter-proses guna mencapai hasil yang diinginkan.

Analisis varians merupakan sebuah teknik perhitungan yang memungkinkan estimasi kuantitatif terhadap kontribusi setiap faktor terhadap semua pengukuran respon. Penerapan analisis varians pada desain parameter bermanfaat untuk mengidentifikasi kontribusi faktor-faktor tersebut, sehingga dapat menentukan akurasi perkiraan model. Metode Taguchi mengembangkan konsep S/N (ratio Signal-to-Noise) untuk eksperimen yang melibatkan banyak faktor. Rasio S/N dirumuskan sedemikian rupa sehingga memungkinkan pemilihan nilai level faktor yang memberikan karakteristik kualitas eksperimen yang optimal. Melalui perhitungan rasio S/N, dapat diperoleh karakteristik kualitas yang diinginkan, apakah itu semakin kecil semakin baik, semakin besar semakin baik, atau ditujukan pada suatu nilai tertentu.

Penjelasan mengenai karakteristik kualitas dalam Metode Taguchi dapat diuraikan sebagai berikut:

a. *Smaller-the-Better* (STB), karakteristik kualitas ini mengindikasikan bahwa semakin rendah nilai suatu parameter, maka kualitasnya akan semakin baik. Sebagai contoh, dalam proses pemesinan, kekasaran permukaan yang semakin kecil akan menghasilkan permukaan yang lebih baik. Contoh lainnya adalah keausan pahat potong. Rumus SN Ratio (SNR) untuk karakteristik ini dinyatakan dengan :

$$\text{SNR STB} = -10\log[Xi(j)^2] \dots \text{Pers. 2.1}$$

Dimana;

$Xi(j)$ = nilai eksperimen ke -i pada respon ke-j

b. *Larger-the-Better* (LTB), karakteristik kualitas ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai suatu parameter, maka kualitasnya akan semakin baik. Contoh dari karakteristik ini adalah kekuatan material, efisiensi bahan bakar, dan sebagainya. Rumus SNR untuk karakteristik LTB dinyatakan dengan:

Nilai S/N untuk jenis LTB adalah :

$$\text{SNR LTB} = -10\log \left[\frac{1}{Xi(j)^2} \right] \dots \text{Pers 2.2}$$

Dimana :

$Xi(j)$ = nilai eksperimen ke -i pada respon ke-j

c. *Nominal-the-Better* (NTB), karakteristik kualitas ini menetapkan suatu nilai nominal tertentu dan semakin mendekati nilai nominal tersebut, maka kualitasnya akan semakin baik. Contoh dari karakteristik ini adalah clearance,

viskositas, dan sebagainya. Rumus SNR untuk karakteristik NTB dinyatakan dengan :

$$\text{SNR NTB} = \log[Xi(j) - m^2] \dots \dots \dots \text{Pers 2.3}$$

Dimana :

$Xi(j)$ = nilai eksperimen ke -i pada respon ke-j

m = nilai target spesifikasi

2.11. Grey Relational Analysis (GRA)

Grey Relational Analysis (GRA) pertama kali diperkenalkan oleh Deng (1989) dan telah menjadi alat yang umum digunakan oleh para peneliti untuk menyederhanakan analisis data multivariat. Konsep dasarnya adalah bahwa tidak ada informasi yang benar-benar hitam atau benar-benar putih. Warna hitam melambangkan kurangnya informasi, sementara warna putih melambangkan informasi yang maksimal. Dengan menggunakan GRA, optimisasi multivariat dapat disederhanakan menjadi optimisasi univariat, sehingga mempermudah proses analisis dan pengambilan keputusan.

Menurut Lande dan Patil (2015) langkah-langkah dalam GRA adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi karakteristik kinerja dan parameter pemotongan untuk dievaluasi.
2. Tentukan jumlah level untuk parameter proses.
3. Pilih *orthogonal array* yang sesuai dan tetapkan parameter pemotongan ke *orthogonal array*.
4. Lakukan eksperimen berdasarkan pengaturan susunan *orthogonal array*.
5. Normalisasi hasil percobaan.
6. Hitung koefisien relasional grey.

7. Hitung tingkat hubungan grey dengan rata-rata koefisien *grey relational*.
8. Menganalisis hasil eksperimental menggunakan tingkat *grey relational grade*.
9. Menghitung nilai prediksi dari GRG maupun respon.
10. Melakukan ANOVA terhadap nilai GRG.
11. Pilih tingkat optimal parameter pemotongan.
12. Verifikasi parameter pemotongan optimal melalui percobaan konfirmasi.

2.12. Langkah Pendekatan *Grey Relational Analysis* (GRA)

Langkah pendekatan melakukan analisa dengan memakai GRA dengan dibantu *Principal Component Analysis* (PCA) menurut Lou dkk, (2009) adalah :

1. Menghitung *SN Ratio* sesuai dengan Metode Taguchi.
2. Melakukan normalisasi *SN Ratio*.

Besar nilai normalisasi SNR antara 0 sampai 1. Persamaan yang dipakai untuk normalisasi adalah:

$$Xi^*(j) = \frac{Xi(j) - \min Xi(j)}{\max Xi(j) - \min Xi(j)} \dots \text{Pers.2.4}$$

Dimana :

$Xi^*(j)$ = nilai normalisasi SNR pada percobaan ke- i dan respon ke-j

$X_i(j)$ = nilai eksperimen ke -i pada respon ke-j

i = banyaknya percobaan

j = banyaknya respon

3. Menghitung nilai delta

Menghitung jarak $\Delta oi(j)$ yang merupakan nilai absolut dari selisih antara nilai maksimum hasil normalisasi $Xo^*(j)$ dengan data yang telah dinormalisasi $Xi^*(j)$ pada titik j.

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\Delta oi(j) = |Xo^*(j) - Xi^*(j)| \dots \dots \dots \text{Pers. 2.5}$$

Dimana :

$$Xo^*(j) = 1 \text{ (nilai terbesar normalisasi S/N Ratio diinversikan sebesar 1)}$$

4. Menghitung nilai gamma (*Grey Relational Coefficient / GRC*)

GRC menunjukkan hubungan antara kondisi terbaik dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai GRC adalah sebagai berikut :

$$\gamma_{oi} = \frac{\Delta min + \zeta \Delta maks}{\Delta oi(j) + \zeta \Delta maks} \dots \dots \dots \text{Pers. 2.6}$$

Dimana:

$$\Delta min = \text{nilai minimum dari } \Delta oi(j)$$

$$\Delta maks = \text{nilai maksimum dari } \Delta oi(j)$$

$$\zeta = \text{koefisisien pembeda, biasanya diambil nilai 0,5}$$

5. Menghitung *Grey Relational Grade*

Rumus yang dipakai adalah:

$$\Gamma_{oi(j)} = \sum_{j=1}^n \beta_j \gamma_{oi(j)} \dots \dots \dots \text{Pers. 2.7}$$

Dimana β_j menggambarkan nilai bobot ke-j dari karakteristik respon dan nilai bobot diperoleh dari nilai vektor eigen komponen utama terpilih yang dikuadratkan. Misalkan komponen utama yang terpilih adalah komponen utama 1.

$$\beta_j = a_{ij}^2, \text{ dengan } a_{11}^2 + a_{12}^2 + \dots + a_{ik}^2 = 1$$

Sedangkan:

a11 : nilai pertama dari vektor eigen 1

a12 : nilai kedua dari vektor eigen 1

a1k : nilai ke-k dari vektor eigen 1

Nilai β_j ini dapat dicari dengan PCA. Cara praktisnya dapat menggunakan *software* perhitungan seperti Minitab, dengan memasukkan nilai GRG dan nilai masing-masing respon. Vektor eigen terbesar yang akan dipilih sebagai pembobot.

6. Menghitung nilai prediksi

Nilai GRG kombinasi faktor yang tidak ada dalam kombinasi run order Metode Taguchi dapat diprediksi dengan rumus (Puh, *et. al*, 2016) :

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \dots \dots \dots \text{Pers. 2.8}$$

Dimana:

$\hat{\gamma}$ = Nilai prediksi GRG

γ_m = Nilai total rata-rata GRG

$\bar{\gamma}_i$ = Nilai rata-rata GRG pada tiap optimal level

k = jumlah parameter atau faktor yang berpengaruh

2.13. *Analysis of Variance (ANOVA)*

Analysis of Variance (ANOVA) adalah sebuah metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi perbedaan atau kesamaan antara dua atau lebih kelompok data. Metode ini didasarkan pada perbandingan rata-rata dari variabel yang diamati. Salah satu metode yang sering digunakan dalam analisis ANOVA adalah Pareto ANOVA, yang digunakan untuk mengukur pentingnya setiap parameter proses dalam proses-produksi. Dengan menggunakan Pareto ANOVA, kita dapat mengidentifikasi parameter-proses yang memiliki kontribusi signifikan terhadap variasi atau perbedaan dalam hasil produksi. Langkah dalam ANOVA adalah sebagai berikut :

- Menentukan derajat bebas total, error dan setiap faktor

Tabel 2.3. ANOVA untuk empat faktor dan 3 level

Sumber keragaman	Derajat Bebas	Jumlah kuadrat	Rata2 kuadrat	F-hitung
A	a-1	SS _A	MS _A	MS _A / MS _{Error}
B	b-1	SS _B	MS _B	MS _B / MS _{Error}
C	c-1	SS _C	MS _C	MS _C / MS _{Error}
D	d-1	SS _D	MS _D	MS _D / MS _{Error}
Error	d _{be}	SS _{Error}	MS _{Error}	
Total	N-1	SS _T		

Dimana:

a : banyak level faktor A

b : banyak level faktor B

c : banyak level faktor C

d : banyak level faktor D

N : jumlah eksperimen

Jumlah derajat bebas total dB_T = N-1

Jumlah derajat bebas A (dB_A) = a-1

Jumlah derajat bebas B (dB_B) = b-1

Jumlah derajat bebas C (dB_C) = c-1

Jumlah derajat bebas D(dB_D) = d-1

Jumlah derajat bebas error (dB_{Error}) = dB_T - dB_A - dB_B - dB_C - dB_D

- Menghitung jumlah kuadrat total, error dan setiap faktor

$$\text{Jumlah kuadrat total} = SS_T = \sum Y_{ijkl}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$\text{Jumlah kuadrat A} = SS_A = \sum \frac{Y_i^2}{3^2} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$\text{Jumlah kuadrat B} = SS_B = \sum \frac{Y_j^2}{3^2} - \frac{Y_{....}^2}{N}$$

$$\text{Jumlah kuadrat C} = SS_C = \sum \frac{Y_k^2}{3^2} - \frac{Y_{....}^2}{N}$$

$$\text{Jumlah kuadrat D} = SS_D = \sum \frac{Y_l^2}{3^2} - \frac{Y_{....}^2}{N}$$

$$\text{Jumlah kuadrat error} = SS_{\text{Error}} = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D$$

3. Menghitung jumlah rata-rata kuadrat total, error dan setiap faktor

$$\text{Jumlah rata-rata kuadrat total} = MS_T = SS_T / dB_T$$

$$\text{Jumlah rata-rata kuadrat A} = MS_A = SS_A / dB_A$$

$$\text{Jumlah rata-rata kuadrat B} = MS_B = SS_B / dB_B$$

$$\text{Jumlah rata-rata kuadrat C} = MS_C = SS_C / dB_C$$

$$\text{Jumlah rata-rata kuadrat D} = MS_D = SS_D / dB_D$$

$$\text{Jumlah rata-rata kuadrat error} = MS_{\text{Error}} = SS_{\text{Error}} / dB_{\text{Error}}$$

4. Menghitung F-hitung setiap faktor

$$F\text{-hitung A} = MS_A / MS_{\text{Error}}$$

$$F\text{-hitung B} = MS_B / MS_{\text{Error}}$$

$$F\text{-hitung C} = MS_C / MS_{\text{Error}}$$

$$F\text{-hitung D} = MS_D / MS_{\text{Error}}$$

5. Uji pengaruh (Uji F)

Uji ini digunakan untuk menguji apakah terdapat pengaruh dari setiap faktor terhadap variabel respon.

Hipotesis:

$$H_0 = A_1 = A_2 = A_3 = 0 \text{ (tidak terdapat efek dari faktor A)}$$

$$H_1 = \text{Minimal ada satu } A_a \neq 0 \text{ (ada efek dari faktor A)}$$

Berlaku juga untuk faktor B, C dan D

Dengan α = taraf signifikansi, maka statistik uji menjadi:

Tolak H_0 jika $F\text{-hitung} > F\text{-tabel}$, atau $p\text{-value} < \alpha$

$F\text{-tabel} = F_{(db \text{ faktor} - 1); (db\text{error}); (\alpha)}$ (Dwijayanti, 2017)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian

Eksperimen penelitian mengenai proses pemesinan *drilling* dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung, Lampung.

3.2. Variabel Penelitian

Percobaan dilakukan dengan menggunakan beberapa variabel penelitian. Variabel yang digunakan untuk mendapatkan data eksperimen proses pengeboran pada penelitian ini sebagai berikut :

3.2.1. Variabel Independen/Proses

Variabel proses adalah variabel yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan sebelum eksperimen dilakukan. Adapun variabel proses yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

a. Diameter Pahat

Pada penelitian ini ukuran diameter pahat yang digunakan dalam penelitian memiliki diameter 4 mm, 6 mm dan 8 mm.

b. Putaran Spindel

Parameter *Cutting Speed (CS)* yang digunakan adalah 10 - 20 m/menit, peneliti menggunakan nilai CS sebesar 10 m/menit sebagai dasar perhitungan putaran spindel. Maka didapat nilai putaran spindel yang akan digunakan dalam penelitian yaitu 398, 530 dan 795 rpm.

c. Kecepatan Pemakanan (*Feeding*)

Feeding pada mesin CNC milling dapat diatur sesuai dengan paramater yang

akan digunakan, berdasarkan penelitian sebelumnya (Atik Pramono, 2021) maka besarnya *feeding* yang digunakan ialah 30 mm/menit, 38 mm/menit dan 46 mm/menit.

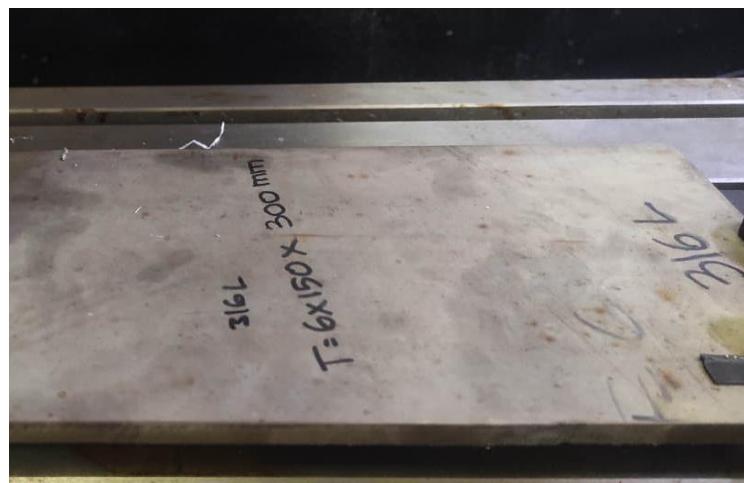
3.2.2. Variabel Respon

Variabel respon merupakan variabel yang nilainya tidak dapat ditentukan dan nilainya dipengaruhi oleh perlakuan selama eksperimen. Yang menjadi variabel respon pada penelitian ini yaitu jumlah lubang dan frekuensi emisi akustik.

3.3. Bahan dan Alat Penelitian

3.3.1. Bahan Eksperimen

Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan paduan Stainless Steel 316 L dengan bentuk pelat dengan ketebalan 6 mm, Panjang 300 mm dan lebar 150 mm.



Gambar 3.1. Material SS316L Tebal 6 mm

Paduan Stainless Steel 316L merupakan jenis baja tahan karat austenitik yang mengandung unsur kromium, nikel, dan molibdenum, yang dirancang khusus untuk memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dalam lingkungan yang

sangat korosif. Sifat tarik dari paduan ini dapat bervariasi, biasanya berkisar antara 550 hingga 650 N/mm². Kandungan karbon yang rendah dalam 316L dipadukan dengan penambahan nitrogen untuk memastikan bahwa 316L memenuhi sifat mekanik dari paduan 316. Paduan 316L mampu menahan korosi atmosfer dan oksidasi sedang. Selain itu, bahan ini mudah untuk dilas dan diproses menggunakan praktik fabrikasi standar (Bhole, 2016).

Tabel 3.1. Komposisi SS316L

Type	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	Si	S
316L	0,030 max	16 - 18	2 max	Min: 2 Max: 3	Min: 10 Max: 14	0,045 max	0,75 max	0,03 max

Sumber : (Matsushita, 2010)

3.3.2. Alat penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Mesin CNC Milling GUT VMC 930E

Mesin CNC yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- Merk : GUT
- Model : VMC 930E
- Panjang Gerakan : Sumbu X 620 mm, sumbu Y 350 mm dan sumbu Z 500 mm
- Coolant : Dry machining
- Spindel Motor : 5,5 kW
- Spindel Taper : BT40
- Spindel Speed : 6000 rpm
- Controller : SIEMENS



Gambar 3.2. Mesin Milling CNC Merk GUT VMC 930E

2. Mata Bor

Mata Bor yang digunakan dalam penelitian berbahan HSS merk Nachi.



Gambar 3.3. Pahat Twist Drill HSS Diameter 4 mm, 6 mm dan 8 mm

3. Kamera USB

Kamera USB digunakan untuk mengambil gambar atau *image* yang akan dianalisa hasil fotonya untuk melihat besarnya nilai keausan mata potong yang sedang berjalan saat penelitian.



Gambar 3.4. Kamera USB Dino-Lite

Spesifikasi alat

Resolusi sensor	:	VGA (640x480)
Interface	:	USB 2.0
Magnifikasi	:	20x – 50x dan sampai 200x
Frame rate maksimum	:	30 fps
LED Lighting	:	4 LED putih untuk iluminasi
Kompatibilitas OS	:	Windows & macOS

4. *Software AutoCAD*

Software ini digunakan untuk mengolah *image* yang didapatkan dari kamera Charged Coupled Device (CCD) dan diukur tingkat keausan alat potong yang sudah ditentukan kriteria aus maksimal 0,2 mm.

5. Peralatan uji emisi akustik terdiri dari perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perangkat keras (*hardware*) yang digunakan antara lain adalah :

- 1 buah *Acoustic Emission Sensor PXR15*



Gambar 3.5. *Acoustic Emission Sensor PXR15*

Tabel 3.2. Spesifikasi *Acoustic Emission Sensor PXR15*

Aspek	Keterangan
Fungsi	Deteksi dan konversi gelombang emisi akustik menjadi sinyal listrik untuk analisis wear/kerusakan
Spesifikasi Umum	Resonant frek ~150 kHz, preamplifier internal 20–40 dB, casing stainless steel
Cara Kerja	Piezoelektrik sensor → amplify → keluarkan ke data acquisition system
Aplikasi	Monitoring keausan pahat, NDT struktural, monitor keretakan & gesekan

- *Pre-Amplifier*

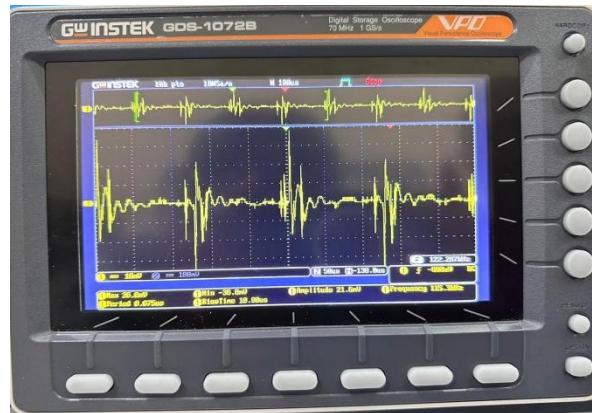


Gambar 3.6. *Pre-Amplifier*

Tabel 3.3. Spesifikasi *Pre-Amplifier*

Aspek	Keterangan
Fungsi Utama	Memperkuat dan mengkondisikan sinyal emisi akustik (AE) beramplitudo rendah dari sensor sebelum diproses oleh sistem akuisisi data
Mode Input	Single-ended dan Differential
Gain (Penguatan)	Dapat dipilih 40 dB dan 60 dB
Bandwidth Frekuensi	Lebar (mendukung sinyal AE berfrekuensi tinggi, puluhan hingga ratusan kHz, tergantung konfigurasi filter)
Cara Kerja	Sinyal AE dari sensor masuk ke preamplifier → diperkuat sesuai gain → difilter → dikirim ke unit akuisisi untuk analisis lanjutan
Aplikasi Umum	Monitoring keausan pahat, pemantauan proses pemesinan, pengujian tak merusak (NDT), dan structural health monitoring

- Osiloskop Digital 2 channel



Gambar 3.7. Osiloskop Digital 2 Channel

Tabel 3.4. Spesifikasi Osiloskop Digital 2 Channel

Aspek / Parameter	Spesifikasi
Model	GW Instek GDS-1072B
Tipe	Digital Storage Oscilloscope (DSO)
Bandwidth	70 MHz (-3 dB)
Kanal Input	2 kanal analog (+ EXT)
Sampling Rate	Maks. 1 GSa/s per kanal
Memori Rekam	10 M titik per kanal
Resolusi Vertikal	8 bit, 1 mV/div – 10 V/div
Impedansi Input	$\sim 1 \text{ M}\Omega // 16 \text{ pF}$
Maximum Input Voltage	300 Vrms (CAT I)
Timebase Range	5 ns/div – 100 s/div
Waveform Update Rate	$\sim 50,000 \text{ wfms/s}$
Display	7" LCD warna (800 \times 480 WVGA)
Antar-Muka	USB host & device (data & kontrol)

Fungsi alat	Osiloskop digunakan untuk menampilkan, mengukur, dan menganalisis sinyal listrik dalam domain waktu dan frekuensi.
Cara kerja	Osiloskop bekerja dengan menangkap sinyal analog melalui probe, mengubahnya menjadi data digital melalui proses sampling, kemudian menampilkan bentuk gelombang pada layar.
Aplikasi	Alat ini diaplikasikan untuk pemantauan sinyal sensor, analisis emisi akustik, serta evaluasi kondisi proses pemesinan dan keausan pahat.

- Power Supply



Gambar 3.8. *Power Supply*

Tabel 3.5. Spesifikasi *Power Supply*

Parameter	Keterangan
Model	ATTEN APS3005S
Output Voltage	0 – 30 V DC (adjustable)
Output Current	0 – 5 A (adjustable)
Output Power	~90 – 150 W (typical)
Input	AC 110 V/220 V, 50 Hz/60 Hz
Display	LED display (voltage 0.1 V, current 0.01 A)
Channel	Single adjustable DC output

- Kabel penghubung antara *Pre-Amplifier* dengan *Oscilloscope*

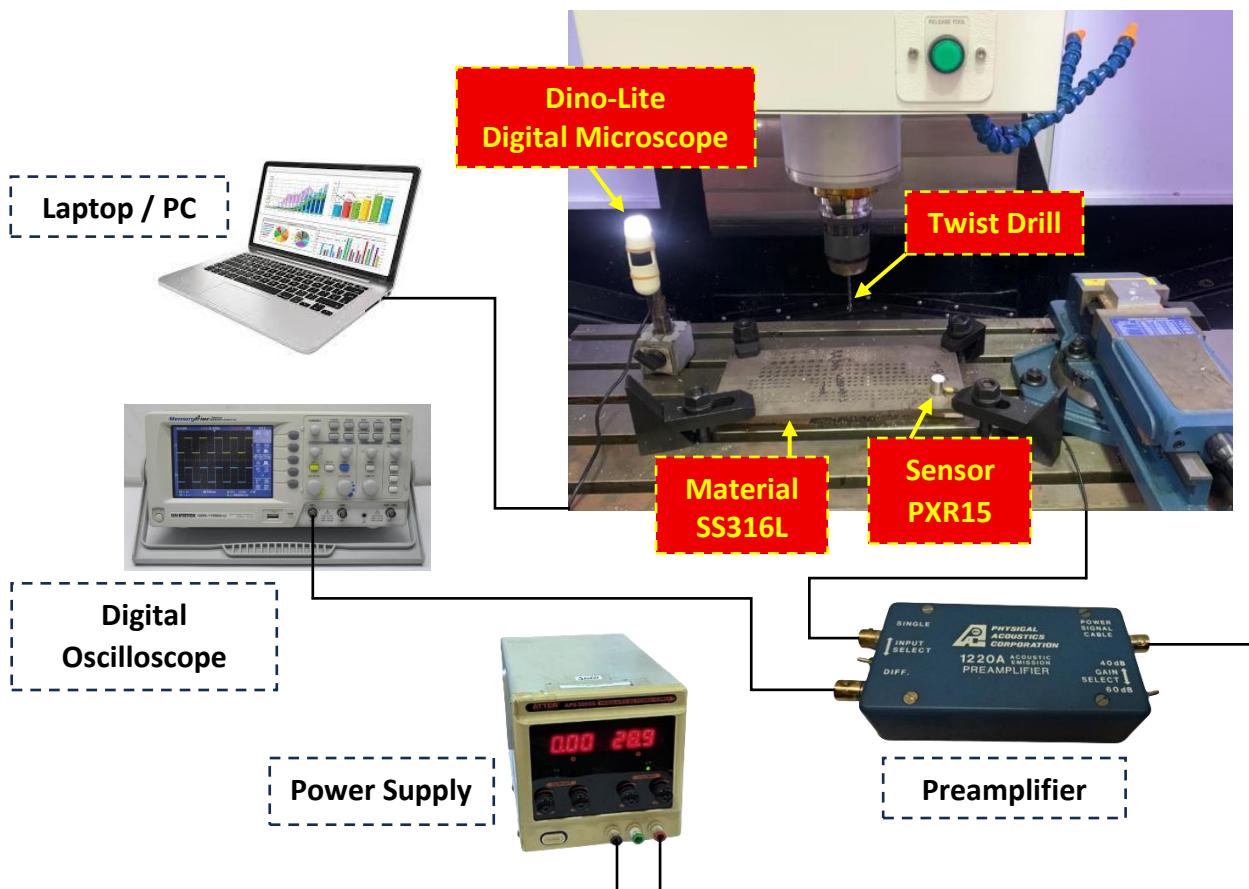


Gambar 3.9. Kabel BNC to BNC

- *Stand Magnetic Fine Adjuster*



Gambar 3.10. *Stand Magnetic Fine Adjuster*



Gambar 3.11. *Experimental Set-up*

Experimental Set-up ini merupakan sistem pemantauan kondisi pemesinan berbasis emisi akustik yang mengintegrasikan komponen mekanis dan elektronik secara *real-time*. Proses dimulai ketika pemotongan *twist drill* pada material SS316L menghasilkan pelepasan energi berupa gelombang elastis frekuensi tinggi yang kemudian ditangkap Sensor PXR15, getaran mekanis tersebut dikonversi menjadi sinyal elektrik. Sinyal yang lemah diperkuat *Preamplifier* dengan dukungan daya dari *Power Supply* agar integritas data terjaga dari gangguan derau (*noise*), lalu divisualisasikan melalui *Digital Oscilloscope* dan diproses lebih lanjut pada Laptop/PC untuk dianalisis karakteristik frekuensi guna mendeteksi fenomena fisis seperti keausan pahat atau deformasi material.

3.4. Rancangan Percobaan

3.4.1. Pengaturan Variabel pada Mesin Milling CNC

Penelitian ini dilakukan menggunakan 4 parameter dengan 3 level percobaan serta menggunakan Metode Taguchi. *Run Order* penelitian yang dilakukan sebagai berikut :

Tabel 3.6. Run Order Penelitian

No	Faktor	Nomenklatur	Unit	Values		
				I	II	III
1	Diameter pahat	A	mm	4	6	8
2	Kecepatan Spindel	B	rpm	398	530	795
3	Kecepatan Pemakanan	C	mm/mnt	30	38	46
4	Sudut Ujung Pahat	D	derajat	90	118	135

Untuk parameter diameter pahat, kecepatan spindel, kecepatan pemakanan, dan sudut ujung pahat mengacu pada penelitian sebelumnya oleh Atik Pramono (2023) yang menggunakan diameter pahat 4, 6, dan 8 mm. Penelitian ini juga menggunakan nilai parameter kecepatan pemakanan yang sama yaitu 30, 38, dan 46 mm/menit. Selain itu juga menggunakan parameter sudut ujung pahat dengan variasi 90, 118, dan 135 derajat. Selain itu parameter kecepatan spindel yang digunakan yaitu 597, 796, dan 1194. Sedangkan penulis menggunakan parameter yang berbeda untuk kecepatan spindel yang lebih rendah yaitu 398, 530, dan 795.

Pengukuran keausan akan dilakukan di tepi pahat, sementara jumlah percobaan yang didapat dari *software* olah data menggunakan Metode Taguchi didapat 9 kali percobaan.

Urutan percobaan dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 3.7. Urutan Percobaan

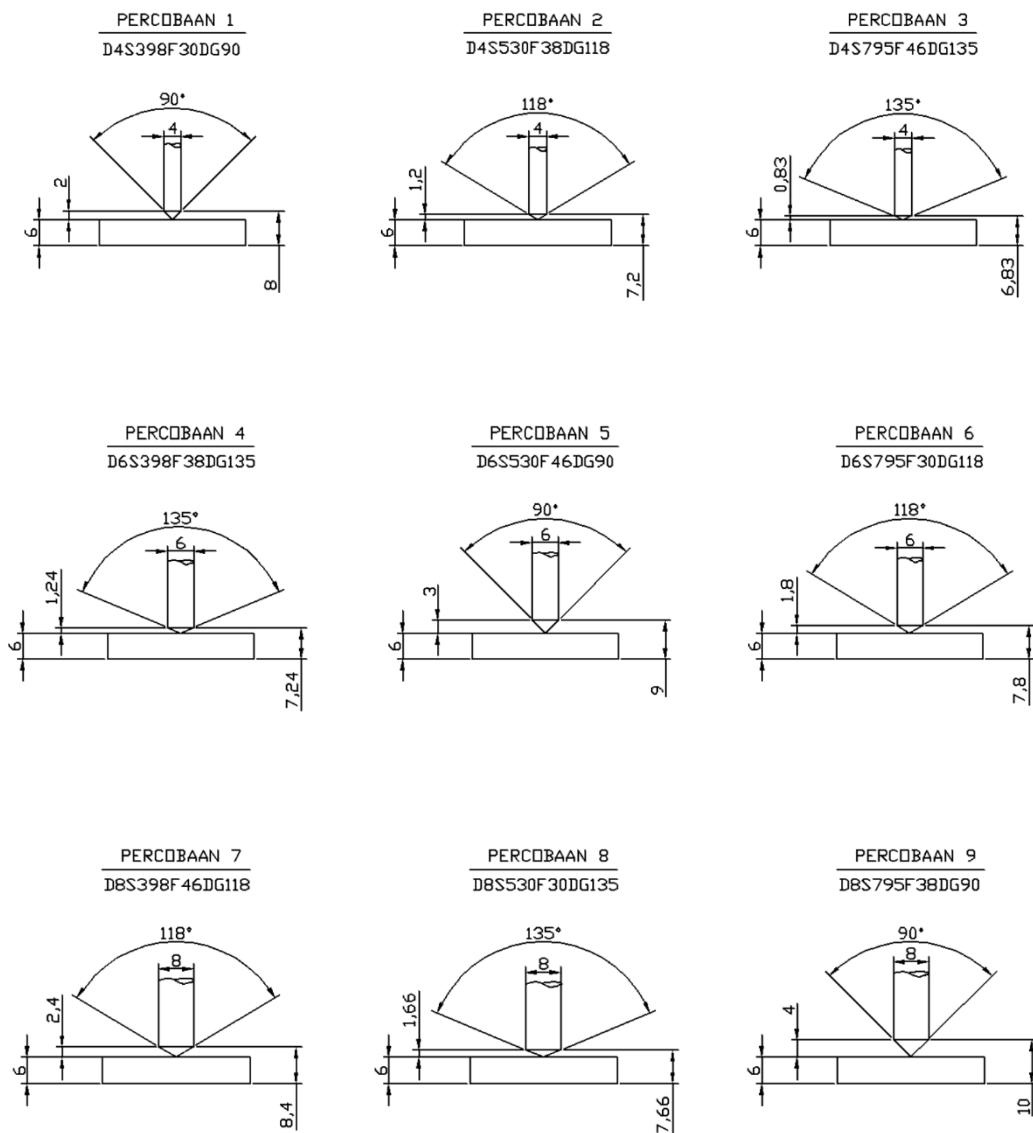
Eksperimen	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Dari tabel eksperimen Metode Taguchi tersebut maka dapat didapat parameter tiap *run order* sebagai berikut :

Tabel 3.8. Nilai Tiap Faktor

Run Order	Diameter pahat (mm)	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Pemakanan (mm/mnt)	Sudut Ujung Pahat (derajat)
1	4	398	30	90
2	4	530	38	118
3	4	795	46	135
4	6	398	38	135
5	6	530	46	90
6	6	795	30	118
7	8	398	46	118
8	8	530	30	135
9	8	795	38	90

Pada penelitian ini dilakukan dengan 4 parameter proses pemesinan *drilling* menggunakan mesin CNC dengan 3 level percobaan. Pengkombinasiannya *Run Order* menggunakan Metode Taguchi. Dari hasil percobaan, dilakukan dua kali pengambilan data jumlah lubang untuk mengetahui umur pahat. Di mana panjang pemotongan pada setiap lubang dihitung berdasarkan tebal material ditambah dengan jarak antara tepi pahat dan ujung pahat, untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar di bawah ini :



Gambar 3.12. Panjang Pemotongan (L) pada Masing-Masing Run Order

Panjang pemotongan pada masing-masing spesimen pahat dengan *point angle* 90° , 118° , dan 135° . Diameter pahat yang digunakan masing-masing yaitu diameter 4 mm, 6 mm dan 8 mm.

Langkah pertama adalah menentukan jenis proses *pengeboran* yang digunakan dalam penelitian. Berikutnya menentukan parameter yang akan dipakai dalam proses pengeboran pada pelat SS316L, maka penentuan jumlah level dan pengaturan parameter disesuaikan dengan kategori yang telah ditentukan.

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan Taguchi L9 sebagai berikut :

Tabel 3.9. Tabel Rancangan Percobaan Taguchi L9

Eksperimen	Diameter Pahat (mm)	Kecepatan Spindel (rpm)	Feeding (mm/mmt)	Sudut Ujung Pahat (derajat)	Panjang Pemotongan (mm)	Waktu Pemesinan (menit)	Jumlah Lubang (pcs)	Frekuensi (MHz)
1	4	398	30	90				
2	4	530	38	118				
3	4	795	46	135				
4	6	398	38	135				
5	6	530	46	90				
6	6	795	30	118				
7	8	398	46	118				
8	8	530	30	135				
9	8	795	38	90				

Berikut ini merupakan contoh perhitungan untuk umur pahat atau dalam konversi waktu pemesinan dalam menit pada *run order* 1 :

$$\begin{aligned}
 Waktu\ Pemesinan &= \frac{Panjang\ Pemotongan\ x\ Jumlah\ Lubang}{Feeding} \\
 &= \frac{8\ mm\ x\ 21}{30\ mm/menit} \\
 &= \frac{168\ mm}{30\ mm/menit} \\
 &= 5,6\ menit
 \end{aligned}$$

3.4.2. Prosedur Pelaksanaan Percobaan

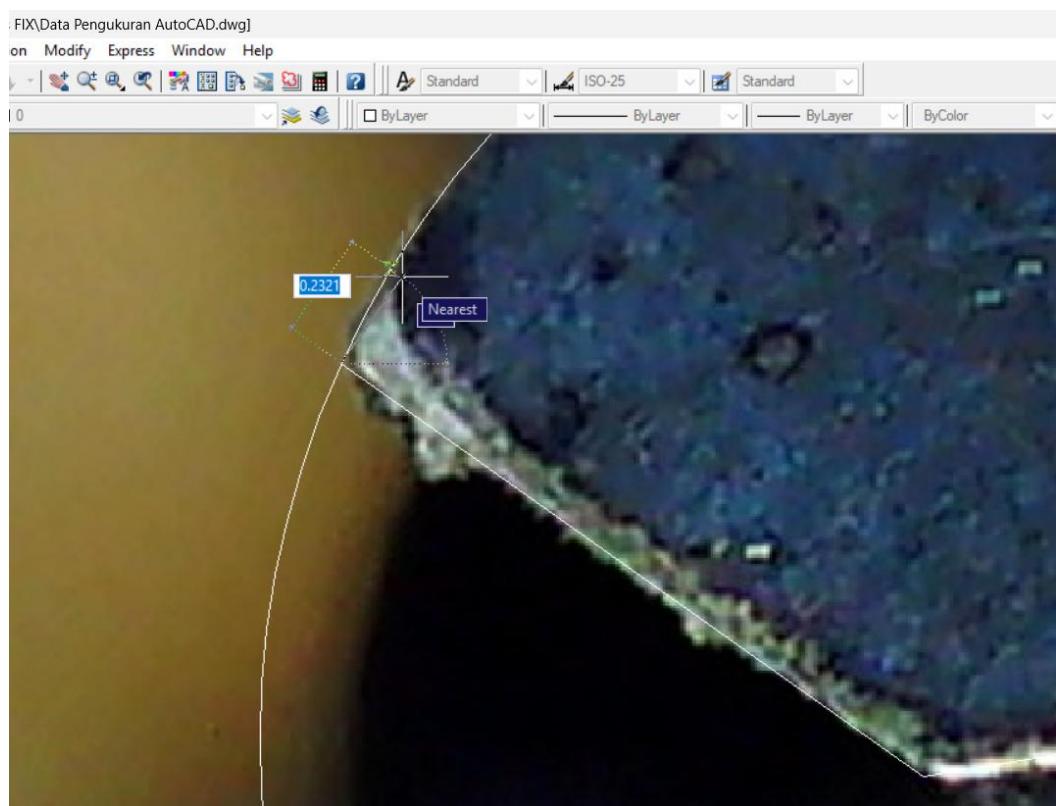
Langkah-langkah pelaksanaan percobaan adalah sebagai berikut :

- a. Menyiapkan benda kerja dan pahat, dilakukan untuk memastikan pahat dalam kondisi siap pakai.
- b. Memasang benda kerja pada meja mesin selanjutnya dicekam menggunakan clamping set.
- c. Setting titik nol benda kerja pada mesin CNC milling.
- d. Menentukan titik henti pahat diatas kamera untuk mendapatkan *image* yang baik dan jelas.
- e. Memasukkan program pengeboran dari PC/Laptop ke mesin CNC milling.
- f. Menjalankan *test run* mesin untuk memastikan program sesuai dengan yang akan dijalankan.
- g. Menjalankan program pengeboran mesin CNC dan melakukan pengukuran terhadap *image* serta frekuensi emisi akustik yang terjadi pada saat proses berlangsung.
- h. Setelah mendapatkan nilai keausan yang ditentukan maka proses pengeboran dihentikan dan dilanjutkan dengan pahat yang lain.
- i. Siklus diulang sampai semua parameter selesai dijalankan.

3.5. Pengukuran dan Pengambilan Data

3.5.1. Pengambilan Data Keausan Pahat

Kamera mikroskop USB digunakan untuk mengambil image pada penampang pahat serta untuk mengamati keausan yang terjadi pada proses pengeboran yang dilakukan. Pahat akan berhenti diatas kamera ketika selesai melakukan proses pengeboran sebanyak 3 lubang. Selanjutnya *image* akan diolah menggunakan software *AutoCAD* untuk mengukur nilai keausan yang terjadi. Proses pengeboran dilakukan sampai mencapai nilai keausan 0,2 mm.



Gambar 3.13. Pengukuran Keausan Tepi Pahat

3.5.2. Pengambilan Data Frekuensi

Pada proses pengeboran tentu akan mengalami perubahan frekuensi dibandingkan dengan putaran tanpa beban. Maka perlu dilakukan pengukuran dengan cara sebagai berikut :

- a. Siapkan osiloskop digital yang akan digunakan, kemudian catat nilai frekuensi yang terukur dan dicatat dengan PC/Laptop.
- b. Saat mesin dijalankan maka akan terbaca nilai frekuensi secara real time.
- c. Rekam pembacaan frekuensi selama proses pengeboran berlangsung, jika sudah selesai dilanjutkan untuk export data ke dalam excel.

Pengambilan data uji emisi akustik berupa frekuensi menggunakan perangkat osiloskop digital. Setelah sinyal emisi akustik berupa frekuensi diperoleh dari eksperimen maka data tersebut harus dianalisis untuk menentukan kondisi keausan pahat. Sinyal emisi akustik biasanya meningkat seiring bertambahnya keausan pahat, terutama ketika pahat mengalami keausan adhesif atau abrasif.

Amplitudo sinyal merupakan peningkatan amplitudo yang biasanya mengindikasikan adanya kerusakan yang lebih parah pada pahat. Frekuensi kejadian berupa frekuensi tinggi yang dapat menunjukkan kerusakan seperti retak mikro, sedangkan frekuensi rendah mungkin menunjukkan interaksi gesekan antara pahat dan benda kerja.

3.6. Tahap Analisa Data

Pada tahap ini, pengumpulan dan pengolahan data dilakukan. Tahap ini meliputi pengumpulan data, pengaturan data, perhitungan serta penyajian data dalam tampilan tertentu sesuai dengan desain yang dipilih. Selain itu, perhitungan dan pengujian data statistik dilakukan pada data hasil eksperimen.

Pada penelitian ini setelah data diperoleh maka dilanjutkan dengan proses perhitungan analisa menggunakan metode *Grey Relational Analysis* (GRA). Dimana nantinya data statistik dapat dicari tingkat optimal parameternya dan verifikasi parameter pemotongan optimal melalui percobaan konfirmasi.

Data yang diperoleh dalam penelitian kemudian diolah dengan tahap-tahap sebagai berikut :

1. Menghitung *Signal Noise Ratio (SNR)*.
2. Normalisasi SNR.
3. Menghitung nilai delta (*Grey Relational Coefficient / GRC*).
4. Menghitung *Grey Relational Grade (GRG)*.
5. ANOVA.
6. Uji F.
7. Mendapatkan kondisi optimum proses drilling untuk jumlah lubang dan nilai frekuensi.
8. Pengujian konfirmasi.
9. Membandingkan hasil analisa GRG dengan hasil uji konfirmasi.

3.7. Metode *Least Square*

Metode *Least Square* (Kuadrat Terkecil) dalam statistik adalah teknik analisis yang digunakan untuk menentukan garis atau kurva terbaik yang merepresentasikan hubungan antara variabel bebas (X) dan variabel terikat (Y) dengan cara meminimalkan jumlah kuadrat selisih (error) antara nilai hasil pengamatan dan nilai hasil prediksi model.

Secara umum, pada regresi linear sederhana, model yang dicari berbentuk

$$Y = a + bX$$

dimana nilai konstanta a dan koefisien regresi b ditentukan dengan prinsip kuadrat terkecil, yaitu meminimalkan :

$$\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Metode ini banyak digunakan karena sederhana, efisien, dan mampu memberikan estimasi parameter yang optimal untuk menganalisis tren, melakukan prediksi, serta mengevaluasi hubungan antar variabel, termasuk dalam bidang teknik manufaktur, pemesinan, dan analisis sinyal seperti emisi akustik. Berikut analisa Least Squares (Kuadrat Terkecil) untuk hubungan Waktu Pemesinan (T_m) terhadap Frekuensi (kHz). Maka bisa digunakan model garis lurus (regresi linear):

$$f = a + b T_m$$

dengan f = frekuensi (kHz) dan T_m = waktu pemesinan.

1. Prinsip Least Squares (Linear)

Meminimalkan jumlah kuadrat galat :

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n (f_i - (a + bT_{m,i}))^2$$

Turunkan terhadap a dan b , lalu set = 0, menghasilkan persamaan normal :

$$\begin{aligned} na + b\sum T_m &= \sum f \\ a\sum T_m + b\sum T_m^2 &= \sum(T_m f) \end{aligned}$$

selanjutnya mencari nilai koefisiennya :

$$b = \frac{n\sum(T_m f) - (\sum T_m)(\sum f)}{n\sum(T_m^2) - (\sum T_m)^2}$$

$$a = \frac{\sum f - b\sum T_m}{n}$$

2. Merekap nilai jumlah (Σ) dari data

Dari contoh perhitungan pada percobaan pertama (Run Order 1) :

$$n = 21$$

$$\Sigma T_m = 61.6$$

$$\Sigma f = 8182.5$$

$$\Sigma T_m^2 = 235.447646$$

$$\Sigma(T_m f) = 32219.22146$$

3. Menghitung koefisien b dan a (substitusi angka)

$$b = \frac{21(32219.22146) - (61.6)(8182.5)}{21(235.447646) - (61.6)^2}$$

$$b = \frac{172561.65066}{1149.840566} = 150.0744$$

Lalu mencari nilai koefisien a :

$$a = \frac{8182.5 - (150.0744)(61.6)}{21} = -50.5754$$

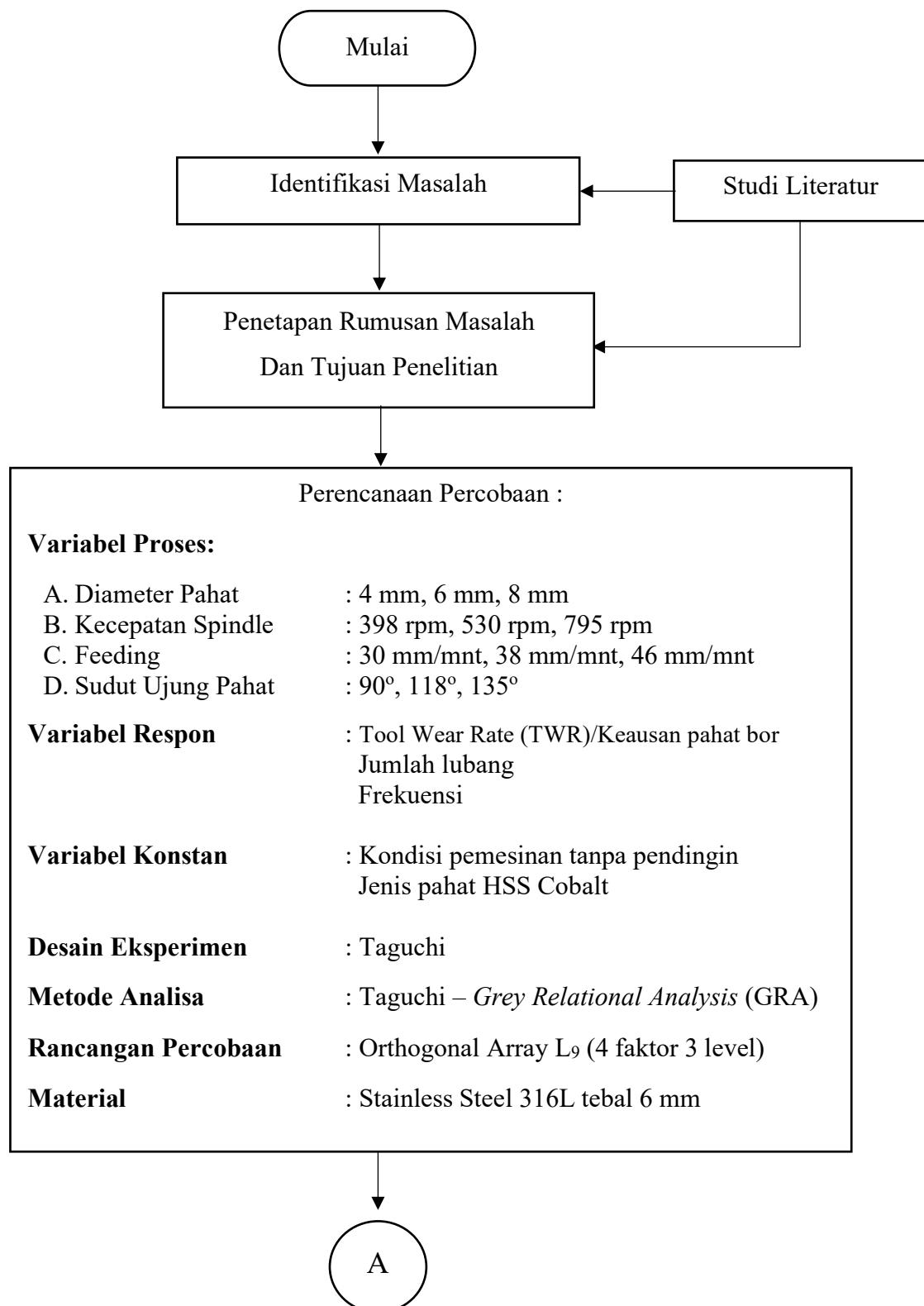
4. Persamaan garis terbaik (*Least Squares*)

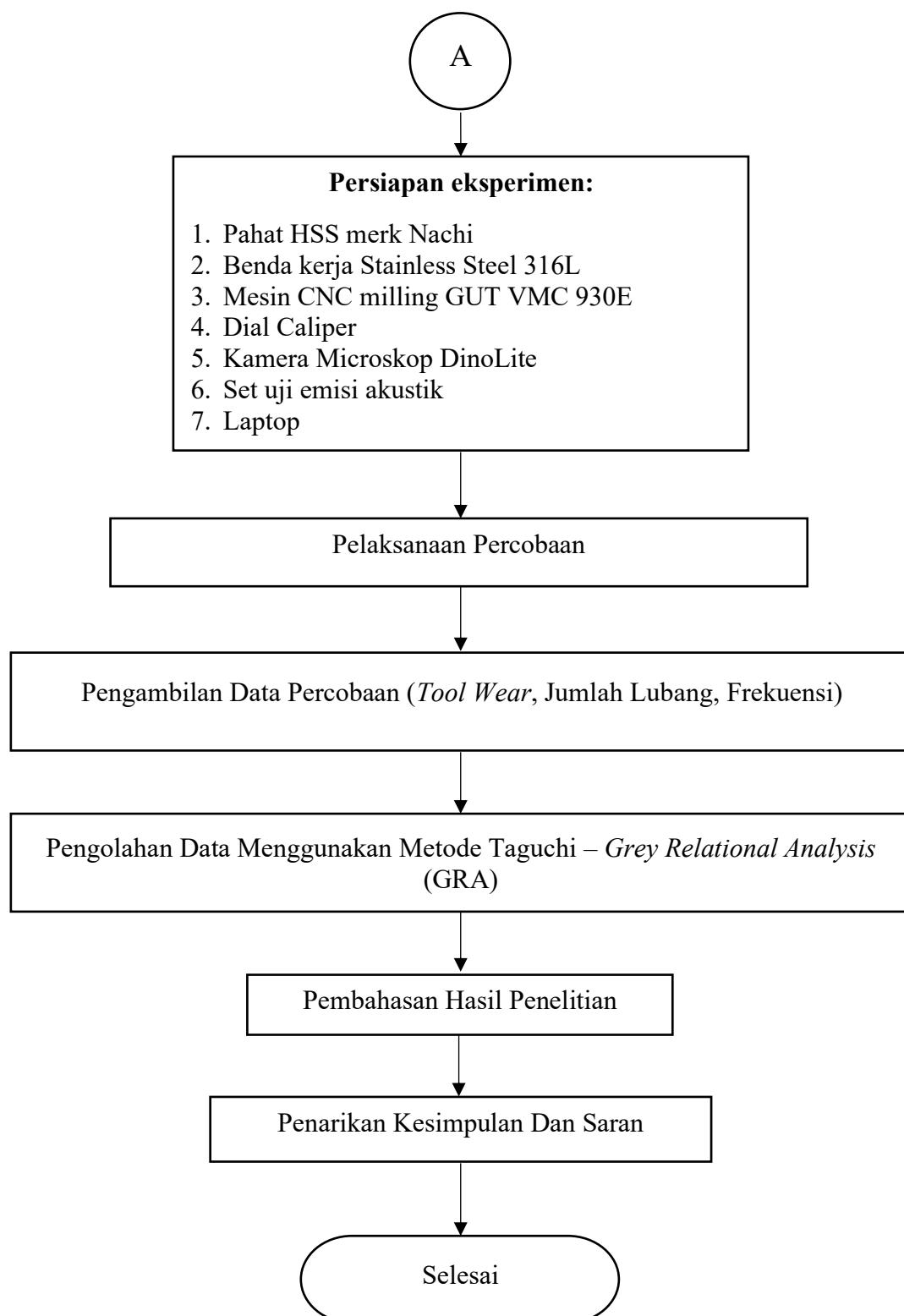
$$f (\text{kHz}) = -50.5754 + 150.0744 T_m$$

Interpretasi kemiringan (slope) setiap kenaikan T_m sebesar 1 satuan waktu akan menaikkan frekuensi rata-rata sekitar 150.07 kHz (berdasarkan tren linear data).

3.8. Diagram Alir Penelitian

Selanjutnya menetapkan tahapan penelitian agar penelitian yang dilakukan dapat terarah pada tujuan penelitian. Gambar diagram berikut ini menunjukkan diagram alir dari penelitian yang dilakukan.





Gambar 3.14. Diagram Alir Penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Melalui pembahasan pada bab sebelumnya maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut ini :

1. Dengan menggunakan Metode Taguchi, hasil penelitian mengungkapkan bahwa seluruh faktor pemesinan yang diobservasi memiliki dampak yang signifikan terhadap jumlah lubang yang terbentuk dimana faktor yang memiliki kontribusi paling dominan adalah diameter pahat dengan tingkat partisipasi mencapai 61,40%. Sementara itu faktor sudut ujung pahat juga membawa pengaruh yang signifikan terhadap nilai frekuensi, dengan tingkat kontribusi mencapai 36,96%.
2. Melalui penerapan Metode *Grey Relational Analysis (GRA)* ditemukan kombinasi optimal dari faktor percobaan yang paling efektif adalah A1 B2 C2 D2 yaitu diameter pahat 4 mm, kecepatan spindel 530 rpm, kecepatan pemakanan 38 mm/mnt, sudut ujung pahat 118°. Faktor sudut ujung pahat menunjukkan pengaruh yang paling signifikan dengan kontribusi 47,79% dalam hasil eksperimen. Dalam kondisi optimal tersebut, nilai respon jumlah lubang mencapai 88,5 lubang, sementara nilai frekuensi mencapai 0,03648 MHz sehingga mengindikasikan prestasi terbaik yang dapat dicapai dalam eksperimen ini. Setelah dilakukan uji konfirmasi, hasil *Grey Relational Grade (GRG)* dari faktor optimal **A1 B2 C2 D2** adalah sebesar 0,881. Nilai itu meningkat sebesar 14,25% dari nilai GRG awal yaitu 0,772.

5.2. Saran

Saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Pengembangan penelitian lanjutan disarankan dengan memperluas variasi spesifikasi pahat bor yang digunakan, seperti perbedaan geometri sudut ujung, panjang heliks, serta jenis material pahat (misalnya HSS, karbida, atau pahat berlapis TiN (*Titanium Nitride*) / TiAlN (*Titanium Aluminium Nitride*)).
2. Ruang lingkup penelitian juga dapat diperluas dengan mengaplikasikan metode yang sama pada material biomedis lain yang memiliki karakteristik mekanik dan termal berbeda dari Stainless Steel 316L, seperti Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) atau paduan Magnesium (Mg–Ca, Mg–Zn). Pengujian terhadap material tersebut dapat memberikan wawasan baru mengenai perilaku getaran, mekanisme pembentukan geram, serta pola emisi akustik selama proses pengeboran untuk aplikasi medis yang lebih luas.
3. Dalam konteks aplikasi biomedis, disarankan agar proses pengeboran dilakukan menggunakan twist drill dengan diameter ≤ 6 mm. Pemilihan ukuran ini didasarkan pada dimensi umum baut dan sekrup implan yang digunakan pada prosedur ortopedi, sehingga hasil penelitian dapat lebih representatif terhadap kondisi nyata dibidang kedokteran dan dapat berkontribusi langsung terhadap peningkatan presisi pembuatan komponen implan.

DAFTAR PUSTAKA

Ammouri, A. H., & Hamade, R. F. (2011). Advances in Sustainable Manufacturing. *Advances in Sustainable Manufacturing*, 2, 115–120.

Aslantas, K., Ekici, E., & Çiçek, A. (2018). Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 128, 419–427. ur

Dutta, S., Pal, S. K., Mukhopadhyay, S., & Sen, R. (2013). Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(3), 212–232.

Fikri, A. A., Mahardika, M., Purwanto, T. P., Sudiarso, A., Teknik, D., Fakultas, M., Universitas, T., & Malang, N. (2014). *Online Monitoring Keausan Cutting Tool*. 1, 1–9.

Gopal, P. M., & Soorya Prakash, K. (2018). Minimization of cutting force, temperature and surface roughness through GRA, TOPSIS and Taguchi techniques in end milling of Mg hybrid MMC. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 116, 178–192.

Hassan, S., Khan, S. A., Naveed, R., Saleem, M. Q., Mufti, N. A., & Farooq, M. U. (2023). Investigation on tool wear mechanisms and machining tribology of hardened DC53 steel through modified CBN tooling geometry in hard turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(1–2), 547–564. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11528-5>

Ilham, M. M., & Mufarrih, A. (2018). *Pengaruh Sudut Ujung Pahat terhadap Delaminasi pada Penggurdian Komposit KFRP Effect of Point Angle on Delamination in Drilling of KFRP Composite*. 8(2).

Jang, W. K., Kim, D. W., Seo, Y. H., & Kim, B. H. (2023). Tool-Wear-Estimation System in Milling Using Multi-View CNN Based on Reflected Infrared Images. *Sensors*, 23(3). <https://doi.org/10.3390/s23031208>

Jantunen, E. (2002). A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. In *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (Vol. 42, Issue 9). [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00040-8)

Kanchana, J., Prasath, V., Krishnaraj, V., & Geetha Priyadharshini, B. (2019). Multi response optimization of process parameters using grey relational analysis for milling of hardened Custom 465 steel. *Procedia Manufacturing*, 30, 451–458.

Lubis, S. Y., Putri Askolani, A., Ariyanti, S., Teknologi Industri, J., & Teknik Mesin, P. (2021). *ANALISIS KEAUSAN MATA PAHAT DAN WAKTU PEMOTONGAN PADA PROSES DRILLING BAJA S 45 C*.

Matsushita, T. (2010). Orthopaedic applications of metallic biomaterials. In *Metals for Biomedical Devices*. <https://doi.org/10.1533/9781845699246.4.329>

Mohamed, A. (2014). *Deep Neural Network Acoustic Model for ASR*. 03003, 1–8.

Patra, K. (2011). Acoustic Emission Based Tool Condition Monitoring System In Drilling. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, WCE 2011*, 3, 2126–2130.

Paweł Twardowski. (2021). *Identification of tool wear using acoustic emission signal and machine learning methods*.

Pramono, A., Burhanuddin, Y., & Akhyar Ibrahim, G. (2024). Multiresponse optimization of hole number and surface roughness in drilling processes for 316L stainless steel material using Taguchi-grey relational analysis method. *468 Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, 22(5). <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>

Safizadeh, M. S., & Latifi, S. K. (2014). Using multi-sensor data fusion for vibration fault diagnosis of rolling element bearings by accelerometer and load cell. *Information Fusion*, 18(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2013.10.002>

Schmitt, R., Cai, Y., & Pavim, A. (2012). Machine Vision System for Inspecting Flank Wear on Cutting Tools. *ACEEE International Journal on Control System and Instrumentation*, 03(01), 27–31. <https://doi.org/01.IJCSI.03.01.13>

Twardowski, P., Tabaszewski, M., Wiciak – Pikuła, M., & Felusiak-Czyryca, A. (2021). Identification of tool wear using acoustic emission signal and machine learning methods. *Precision Engineering*, 72, 738–744. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.07.019>

Wibowo, Y. T., Siswanto, N., & Suef, M. (2022). Response surface methodology approach in achieving multi-response setup optimization in the machining process. *Salud, Ciencia y Tecnología*, 2(S2). <https://doi.org/10.56294/saludcyt2022190>