

**OPTIMASI MULTIRESPON JUMLAH LUBANG DAN KEKASARAN
PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK MATERIAL STAINLESS
STEEL 316 L DENGAN MENGGUNAKAN METODE
TAGUCHI-GREY RELATIONAL ANALYSIS**

TESIS

Oleh :

**ATIK PRAMONO
2125021008**



**PROGRAM STUDI PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

OPTIMASI PARAMETER MULTIRESPON JUMLAH LUBANG DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK MATERIAL STAINLESS STEEL 316L MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI – GREY RELATIONAL ANALYSIS

Oleh:

ATIK PRAMONO

Proses penggurdian merupakan langkah pembentukan lubang bulat dengan menggunakan mata gurdi. Penggunaan mata gurdi dengan penyesuaian parameter yang tidak tepat dapat mengakibatkan geometri komponen yang memiliki ketidakpresisian dan kekasaran lubang yang tinggi, juga dapat meningkatkan keausan pahat. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan pengaturan parameter gurdi yang optimal guna meminimalkan dua variabel respons, yaitu umur pahat dan kekasaran permukaan pada benda kerja.

Eksperimen dilakukan pada proses penggurdi menggunakan material Stainless Steel 316L dengan menetapkan nilai keausan VB sebesar 0,2 mm. Rancangan percobaan menggunakan matriks ortogonal L9 dengan variasi diameter pahat, kecepatan spindle, feeding, dan sudut ujung pahat, masing-masing dengan tiga level. Percobaan dilakukan dengan dua kali replikasi. Metode analisis grey relational (GRA) digunakan untuk mengoptimalkan karakteristik multirespon hasil eksperimen, di mana umur pahat yang lebih besar dianggap lebih baik dan kekasaran permukaan yang lebih kecil dianggap lebih baik.

Diameter pahat divariasikan antara 4 mm, 6 mm, dan 8 mm. Kecepatan spindle diatur pada 597 rpm, 794 rpm, dan 1194 rpm, feeding dengan nilai 30 mm/menit, 38 mm/menit, dan 46 mm/menit. Sudut ujung pahat yang digunakan adalah 90°, 118°, dan 135°. Hasil optimal menunjukkan bahwa pengaturan terbaik adalah menggunakan diameter pahat 4 mm, kecepatan spindle 796 rpm, feeding 38 mm/menit, dan sudut ujung pahat 135°. Setelah dilakukan uji konfirmasi, kombinasi optimal ini menghasilkan 59 lubang atau umur pahat selama 632,54 detik dengan kekasaran permukaan benda kerja sebesar 0,680 μm . Sudut ujung pahat teridentifikasi sebagai faktor yang paling berpengaruh, dengan kontribusi sebesar 59,80% terhadap multirespon yang diamati.

Kata kunci: *Drilling, Grey Relational Analysis, Umur pahat, Kekasaran Permukaan, Metode Taguchi.*

ABSTRACT

THE OPTIMIZATION OF MULTI-RESPONSE PARAMETERS FOR NUMBER OF HOLE AND SURFACE ROUGHNESS IN DRILLING PROCESSES FOR STAINLESS STEEL 316L USING THE TAGUCHI – GREY RELATIONAL ANALYSIS METHOD

By:

ATIK PRAMONO

The drilling process entails the creation of a circular hole using a drill bit. Inaccurate adjustments to the drill bit parameters can lead to imprecise component geometry, high hole roughness, and increased tool wear. The objective of this study is to identify optimal drill parameter settings to minimize two key response variables: tool life and surface roughness on the workpiece.

Experiments were conducted on the drilling process using Stainless Steel 316L material, with the wear value (VB) set at 0.2 mm. The experimental design utilized an orthogonal matrix L9, varying drill diameter, spindle speed, feed rate, and drill point angle, each at three levels. The experiments were replicated twice. Grey Relational Analysis (GRA) was applied to optimize the multi-response characteristics of the experimental results, favoring a longer tool life and lower surface roughness.

Drill diameters were varied between 4 mm, 6 mm, and 8 mm. Spindle speeds were set at 597 rpm, 794 rpm, and 1194 rpm, with feed rates at 30 mm/minute, 38 mm/minute, and 46 mm/minute. Drill point angles were 90°, 118°, and 135°. Optimal results indicated that the best configuration involved a 4 mm drill diameter, spindle speed of 796 rpm, feed rate of 38 mm/minute, and a drill point angle of 135°. Subsequent confirmation testing of this optimized combination resulted in 59 holes or a tool life of 632,54 seconds, with a workpiece surface roughness of 0.680 μm . The drill point angle emerged as the most influential factor, contributing 59.80% to the observed multi-response.

Keywords: *Taguchi Method, Grey Relational Analysis, Drilling, Number of Holes, Surface Roughness.*

**OPTIMASI MULTIRESPON JUMLAH LUBANG DAN KEKASARAN
PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK MATERIAL STAINLESS
STEEL 316 L DENGAN MENGGUNAKAN METODE
TAGUCHI-GREY RELATIONAL ANALYSIS**

Oleh :

**ATIK PRAMONO
2125021008**

TESIS

Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Magister

**Pada
Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

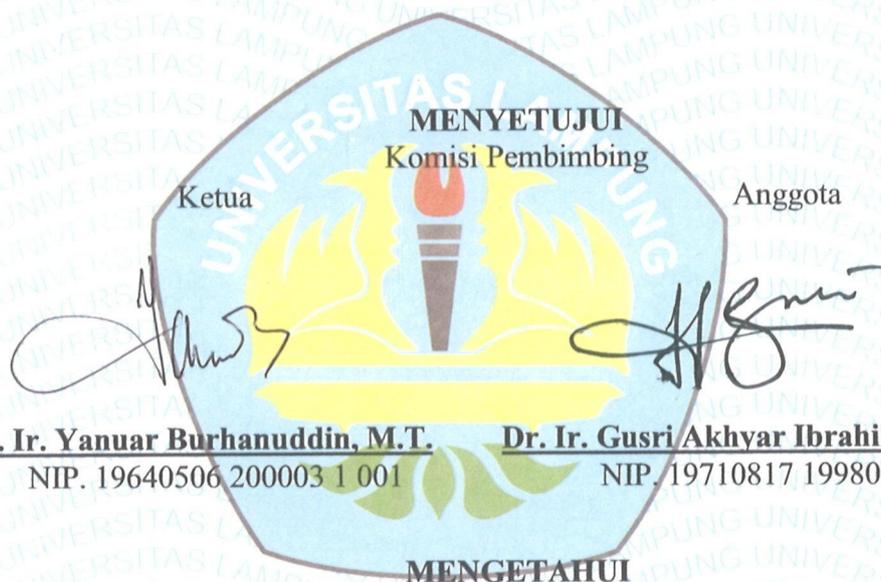
Judul Tesis : **OPTIMASI MULTIRESPON JUMLAH LUBANG DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK MATERIAL STAINLESS STEEL 316L DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY RELATIONAL ANALYSIS**

Nama Mahasiswa : **Atik Pramono**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2125021008**

Program Studi : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.

NIP. 19640506 200003 1 001

Dr. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.

NIP. 19710817 199802 1 003

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

[Signature]

Dr. Amrul, S.T., M.T.

NIP. 197103311999031003

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin

[Signature]

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

NIP. 196906202000031001

MENGESAHKAN

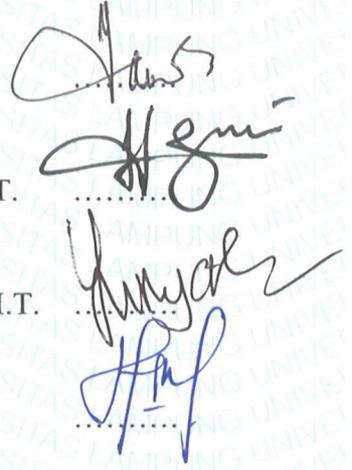
1. Tim Penguji

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

Anggota Penguji : Dr. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim S.T., M.T.

Penguji Utama I : Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.

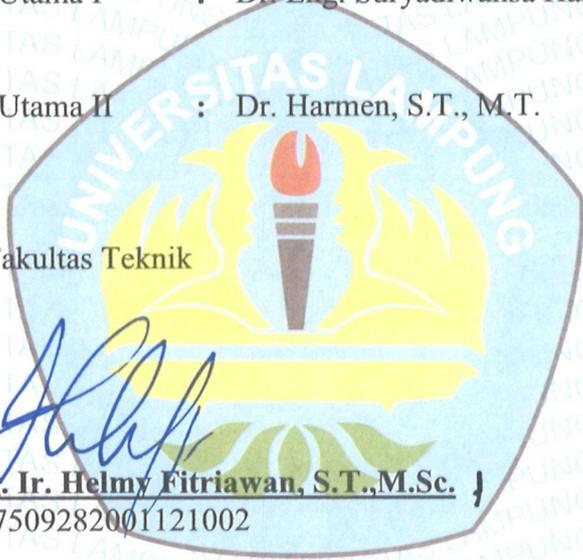
Penguji Utama II : Dr. Harmen, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP. 197509282001121002



3. Direktur Program Pasca Sarjana Universitas Lampung



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

Tanggal Lulus Ujian Tesis: **20 Oktober 2023**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa Tesis dengan judul **“OPTIMASI MULTIRESPON JUMLAH LUBANG DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK MATERIAL STAINLESS STEEL 316 L DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY RELATIONAL ANALYSIS”** adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atas karya orang lain dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiatisme.

Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan, saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 20 Oktober 2023

Yang Membuat



ATIK PRAMONO
NPM. 2125021008

RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir di Pekalongan, Jawa Tengah pada tanggal 30 Desember 1977. Penulis merupakan Putra ke-6 dari pasangan Soeadi dan Suci Rahayu. Pendidikan yang penulis tempuh adalah sebagai berikut:

1. SDN 3 Negara Tulang Bawang, Sungkai Selatan Lampung Utara, Lampung, lulus tahun 1990.
2. SMP PG Bunga Mayang, Lampung Utara, Lampung, lulus tahun 1993.
3. SMAN Kedungwuni, Pekalongan lulus tahun 1996
4. Universitas Muhammadiyah Metro Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Lampung, lulus tahun 2016.

Saat ini penulis bekerja sebagai sebagai staff pengajar di Sekolah Vokasi Sugar Group Companies, Lampung.

PERSEMBAHAN



Perjalanan dalam menulis Tesis ini saya dedikasikan untuk guru saya, pembimbing ruhani saya; Shaikh Muhammad Nadzim ‘Adil Al Haqqani; Shaikh Hisyam Kabbani dan Shaikh Ahmad Asrori Al Ishaqi



UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian tesis ini, antara lain:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung
4. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. sebagai Dosen Pembimbing utama atas kesediaannya memberikan bimbingan, arahan, saran dan masukan dalam proses penyelesaian Tesis ini.
5. Bapak Dr. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. sebagai Dosen Pembimbing kedua dalam proses penyelesaian Tesis ini.
6. Bapak Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. sebagai Dosen Penguji Utama yang telah mengkritisi dan memberikan masukan untuk sempurnanya Tesis ini.
7. Para dosen Pasca Sarjana Teknik Mesin yang sudah memberikan ilmu kepada saya dengan sepenuh hati.
8. Manajemen Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung, yang telah membantu proses pengujian untuk Tesis ini.

9. Bapak dan ibu tercinta yang telah selalu mendoakan anak-anaknya
10. Isteri tercinta Dessy Febriani dan anak-anakku Nabilah, Yusuf dan Ainun, terima kasih atas doa dan dukungannya.
11. Teman – teman Angkatan 2021 Magister Teknik Mesin Universitas Lampung. Terima kasih untuk kebersamaan dan dukungannya, mas Suroyo, mas Riansa, mas Bagas, mas Purnomo, mas Sahab, mas Forghan, mas Priyo, mas Luki, mas Erik.
12. Mas Salam dan pak Dadang yang telah banyak membantu dalam segala jenis pemberkasan.

Bandar Lampung, 20 Oktober 2023
Penulis,

Atik Pramono

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat pertolongan-Nya hingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik di Universitas Lampung.

Tesis dengan judul **“OPTIMASI MULTIRESPON JUMLAH LUBANG DAN KEKASARAN PERMUKAAN PADA PROSES GURDI UNTUK MATERIAL STAINLESS STEEL 316 L DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY RELATIONAL ANALYSIS”** dapat diselesaikan dengan baik berkat bantuan, dukungan dan doa dari banyak pihak.

Namun, penulis menyadari masih banyak kekurangan dan kelemahan dalam penulisan Tesis ini, dengan senang hati penulis menerima kritikan dan saran dari semua pihak untuk sempurnanya Tesis ini. Terima kasih.

Bandar Lampung, 20 Oktober 2023
Penulis,

Atik Pramono

DAFTAR ISI

COVER	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iii
COVER DALAM	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
SURAT PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	ix
UCAPAN TERIMA KASIH	x
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Hipotesa	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Batasan Masalah	7
1.5 Sistematika Penulisan.....	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Pemesinan.....	9
2.2 Proses gurdi	10
2.3 Proses <i>drilling</i> pada mesin <i>milling</i> CNC	12
2.4 Pahat gurdi atau mata bor.....	16
2.5 Keausan Mata Bor	17
2.6 Umur pahat dan persamaan umur pahat Taylor	19
2.7 Kekasaran Permukaan.....	23

2.8	Metode Taguchi	25
2.9	<i>Grey Relational Analysis</i> (GRA)	29
2.10	Langkah Pendekatan GRA	30
2.11	ANOVA (Analysis of Variance).....	32
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		36
3.1	Tempat Penelitian	36
3.2	Bahan	36
3.2.1	Stainless steel 316 L	36
3.2.2	Pahat gurdi / <i>twist drill</i>	39
3.3	Peralatan.....	40
3.4	Desain Eksperimen.....	43
3.4.1	Penentuan faktor dan level	43
3.4.2	Pengambilan data pengujian	45
3.5	Pengolahan Data	48
3.6	Diagram Alir Penelitian	49
BAB 4 PEMBAHASAN		51
4.1	Hasil Pengujian.....	51
4.2	Mencari SN <i>Ratio</i> dan ANOVA Tiap Faktor.....	52
4.3	Analisis Multiresponse Dengan Metode Taguchi – GRA	60
4.3.1	Normalisasi SNR.....	60
4.3.2	Mencari Nilai Delta dan Grey Relational Component (GRC)	61
4.3.3	Grey Relational Grade.....	62
4.3.4	Optimasi Nilai GRG.....	63
4.3.5	ANOVA Terhadap GRG.....	64
4.4	Pengujian Konfirmasi	66
4.5	Pembahasan Hasil Perhitungan dengan Metode <i>Grey Relational Analysis</i>	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		69
5.1.	Kesimpulan	70
5.2.	Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA		71
LAMPIRAN 1		76
LAMPIRAN 2		77

LAMPIRAN 3	78
LAMPIRAN 4	79
LAMPIRAN 5	80
LAMPIRAN 6	81
LAMPIRAN 7	82
LAMPIRAN 8	83
LAMPIRAN 9	84
LAMPIRAN 10	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 ANOVA untuk empat faktor dan 3 level	33
Tabel 3. 1 Komposisi kimia paduan stainless steel 316 L (Bhole, 2016)	37
Tabel 3. 2 Sifat mekanis Stainless steel 316L (Bhole, 2016)	37
Tabel 3. 3 Besaran parameter faktor percobaan.....	44
Tabel 3. 4 Orthogonal Array L9.....	44
Tabel 3. 5 Orthogonal Array dengan besaran level.....	45
Tabel 4. 1 Data hasil percobaan	52
Tabel 4. 2 Signal to Noise Ratio (SN R).....	53
Tabel 4. 3 Faktor optimal masing-masing respon.....	55
Tabel 4. 4 Persentase kontribusi tiap faktor terhadap Jumlah Lubang	56
Tabel 4. 5 Persentase kontribusi tiap faktor terhadap kekasaran permukaan	57
Tabel 4. 6 Hasil optimasi S/N Rasio dan Anova.....	58
Tabel 4. 7 Normalisasi terhadap nilai S/N Ratio.....	61
Tabel 4. 8 Perhitungan Delta dan Grey Relational Coefficient	62
Tabel 4. 9 Nilai Grey Relational Grade (GRG)	62
Tabel 4. 10 Nilai rata-rata GRG tiap faktor	63
Tabel 4. 11 Anova Stepwise menggunakan software SPSS	65
Tabel 4. 12 Hasil pengujian konfirmasi	66
Tabel 4. 13 Rangkuman hasil metode Taguchi dan metode GRA.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Aplikasi SS 316L sebagai penyambung tulang.....	2
Gambar 2. 1 Klasifikasi proses pemesinan	9
Gambar 2. 2 Beberapa proses pemesinan yang paling umum	10
Gambar 2. 3 Tipe lubang (a) through hole (b) blind hole	11
Gambar 2. 4 Proses penggurdian	12
Gambar 2. 5 Bagian-bagian pahat twist drill	16
Gambar 2. 6 Twist Drill (Matsumura, 2010)	17
Gambar 2. 7 Keausan alat sebagai fungsi dari waktu pemotongan.....	20
Gambar 2. 8 Pengaruh cutting speed terhadap flank wear.....	21
Gambar 2. 9 Kekasaran, gelombang dan kesalahan bentuk.....	24
Gambar 3. 1 Pelat Stainless Steel 316L	36
Gambar 3. 2 Kurva tegangan-regangan material Stainless steel 316L	38
Gambar 3. 3 Twist Drill HSS merek NACHI	39
Gambar 3. 4 Mesin CNC Milling 3 axis Merk Feeler VMP40.....	40
Gambar 3. 5 Kamera Mikroskop USB Merk DinoLite.....	41
Gambar 3. 6 Surface Tester Merk Mitutoyo SJ201	42
Gambar 3. 7 Magnetic Holder.....	43
Gambar 3. 8 Dial Caliper Merk Mitutoyo.....	43
Gambar 3. 9 Setting pencekaman benda kerja	46
Gambar 3. 10 Setting kamera mikroskop USB.....	46

Gambar 3. 11 Hasil Proses Pemesinan drilling.....	47
Gambar 3. 12 Pengukuran kekasaran permukaan menggunakan.....	48
Gambar 3. 13 Diagram alir penelitian.....	49
Gambar 3. 14 Diagram alir penelitian (lanjutan)	50
Gambar 4. 1 Panjang pemotongan (L) masing-masing specimen.....	51
Gambar 4. 2 Main effect plot untuk SN Rasio Jumlah Lubang.....	54
Gambar 4. 3 Main effect plot untuk SN Rasio Kekasaran Permukaan.....	54
Gambar 4. 4 Perhitungan Anova terhadap respon Jumlah Lubang.....	56
Gambar 4. 5 Perhitungan Anova terhadap Kekasaran Permukaan	57
Gambar 4. 6 Spesifikasi twist drill merk Nachi	68

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses manufaktur mengacu pada serangkaian langkah yang dilakukan untuk mengubah bentuk material dengan maksud menghasilkan komponen-komponen yang memiliki bentuk, ukuran, dan struktur yang diinginkan menggunakan material tertentu. Pemesinan merupakan bagian penting dari proses manufaktur dan memiliki keterkaitan erat. Di Indonesia, industri manufaktur yang didukung oleh proses pemesinan telah menjadi salah satu pilar utama pertumbuhan sektor non-migas. Sekarang ini, beberapa sektor industri manufaktur yang menggunakan proses pemesinan dalam operasionalnya mengalami peningkatan yang signifikan.

Kementerian Perindustrian mencatat beberapa sektor yang memiliki persentase kinerja di atas PDB secara nasional, diantaranya industri logam dasar sebesar 9,94%. Selain di Indonesia berbagai sektor manufaktur juga dikembangkan di negara ASEAN lainnya, seperti Filipina dan Vietnam. Hal ini tentunya akan mendorong pertumbuhan ekonomi secara nasional dan meningkatkan daya saing secara domestik, regional, dan global. Industri manufaktur ini semakin dikembangkan oleh pemerintah melalui metode hilirisasi. Hal ini harus didukung dengan peningkatan investasi dan kinerja ekspor untuk mempertahankan industri manufaktur dan menjadikannya sebagai penyumbang pajak dan bea cukai terbesar. Perkembangan industri manufaktur di Indonesia pun harus didukung dengan kerjasama dari berbagai pihak, seperti pemerintah, para pengusaha, dan masyarakat umum lainnya.

Perlu diketahui bahwa nilai MVA atau *Manufacturing Value Added* untuk industri manufaktur Indonesia berada di posisi paling atas di antara negara ASEAN dengan pencapaian sebesar 4,5%. Sedangkan secara global, manufaktur Indonesia berada di peringkat ke-9 dari seluruh negara di dunia.

Salah satu kelebihan dari Stainless steel 316L adalah kemampuannya yang tahan terhadap korosi, memiliki sifat mekanik yang kuat, tangguh, elastis, dan permukaan yang mudah dibersihkan. Oleh karena sifat mekaniknya yang tangguh itulah, maka dalam proses pemesinan juga berpengaruh terhadap keandalan pahat / alat potong. Contoh aplikasi bahan Stainless Steel 316 L di dunia medis seperti pada Gambar 1.1 (Aminatun dkk, 2021).



Gambar 1. 1 Aplikasi SS 316L sebagai penyambung tulang

Penelitian pemesinan SS 316L telah banyak dilakukan oleh peneliti. Sultan, 2015 melakukan penelitian proses pengeboran pada material SS 316L menggunakan alat potong *uncoated carbide* dengan diameter $4 \pm 0,01$ mm dengan sudut titik 135° dan sudut heliks 30° pada kecepatan spindle 18 dan 30 mm^{-1} dan laju pemakanan 0,03, 0,045, dan 0,06 mm/rev , kesalahan diameter lubang, dan kekasaran permukaan sebagian besar dipengaruhi oleh kecepatan potong dan laju pemakanan. Sementara itu

feed rate dan *cutting speed* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *circularity error*. Dengan kata lain, kecepatan potong meningkat, kekasaran permukaan menurun. Sebaliknya ketika *feed rate* meningkat, nilai kekasaran permukaan meningkat juga. Pada saat yang sama, keausan pahat mempengaruhi kekasaran permukaan. Untuk kesalahan silinder, kecepatan pemotongan lebih rendah dan *feed rate* yang lebih rendah akan memberikan hasil yang lebih baik. Dalam hal diameter *error*, *feed rate* lebih berpengaruh dibandingkan kecepatan potong. Selama pengeboran baja tahan karat austenitik, bor mengalami mode kegagalan serupa pada semua kecepatan potong dan laju umpan yang digunakan, yaitu keausan sayap yang tidak seragam, *chipping*, dan kegagalan katastropik.

Bhole dkk, (2016) melakukan penelitian proses penggurdian pada material SS 316L, menyatakan bahwa pendekatan taguchi diterapkan secara berturut-turut untuk mendapatkan hasil operasi pengeboran yang optimal pada Alloy 316L untuk mendapatkan kekasaran permukaan minimum dan tingkat pemindahan material dengan feeding sebagai faktor yang paling berpengaruh diikuti oleh kecepatan spindle.

Dalam makalahnya, Sharidan, 2014 menyajikan pengaruh parameter pengeboran terhadap aus tool, umur tool, kekasaran permukaan, akurasi dimensional, dan keliling saat pengeboran material SS 316L menggunakan *HSS tool*. Percobaan dilakukan pada berbagai kecepatan potong yaitu 10, 16, dan 22m/min dengan feed rate tetap sebesar 0.05 dan 0.075mm/rev, dan dalam kondisi kering maupun dengan pendingin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah lubang yang berhasil dibor sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong, dimana semakin tinggi kecepatan potong, jumlah lubang semakin berkurang. Pengukuran kekasaran permukaan menunjukkan hasil yang lebih baik pada kecepatan potong dan *feed rate* yang lebih rendah. Hasil juga menunjukkan

bahwa akurasi dimensional pada *feed rate* yang lebih rendah lebih baik dibandingkan dengan *feed rate* yang lebih tinggi. Dari aspek keliling, ditemukan bahwa *tool* baru memberikan keliling yang baik dibandingkan dengan *tool* yang sudah aus.

Cicek dkk, 2012 dalam penelitiannya mengenai perilaku pemesinan material SS 316 dengan menggunakan mata bor ulir HSS yang telah melalui perlakuan kriogenik dan bor yang tidak melalui perlakuan tersebut. Perilaku pemesinan dari SS 316 dievaluasi berdasarkan gaya dorong, umur tool, kekasaran permukaan, dan kualitas lubang hasil pengeboran. Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan umur tool dari 14% hingga 218% pada *tool* yang telah di perlakukan. Gaya dorong, kekasaran permukaan, dan kualitas lubang juga lebih baik pada *tool* yang telah di perlakukan dibandingkan dengan bor yang tidak di perlakukan. Peningkatan ini sebagian besar disebabkan oleh pembentukan partikel karbida yang halus dan homogen, serta transformasi austenit yang tertahan menjadi martensit. Pengamatan mikrohardness dan mikrostruktur juga memverifikasi pembentukan tersebut.

Rao dkk, 2021 membuat analisis menggunakan kombinasi Taguchi dan *Grey Relational Analysis* (GRA). Digunakan untuk data eksperimen multirespon yang dikumpulkan untuk keausan sisi bor dan kekasaran permukaan. GRA mengubah karakteristik multi respons menjadi satu karakteristik kinerja tunggal dengan menghasilkan GRG. Analisis menunjukkan bahwa kecepatan spindle sebesar 1200 rpm, *feed* bor sebesar 0,2 mm/rev, dan diameter bor 6 mm akan meminimalkan keausan sisi bor dan kekasaran permukaan. Analisis lanjutan GRG dengan teknik Analisis Varian (ANOVA) yang diterapkan pada nilai rata-rata GRG menyimpulkan bahwa diameter bor memiliki signifikansi tertinggi (46,97%), diikuti oleh laju umpan bor (20,37%) dan kecepatan spindle bor (16,10%) terhadap GRG. Uji konfirmasi dilakukan

untuk memverifikasi validitas optimasi GRG yang menunjukkan peningkatan sebesar 6,9% pada nilai GRG eksperimen.

Ahmed dkk, 2018 menyatakan bahwa berdasarkan analisis ragam (ANOVA), parameter-parameter paling efektif terhadap umur pahat telah ditentukan. Secara khusus, bahan pahat merupakan faktor utama yang memiliki dampak tertinggi pada umur pahat. Faktor ini memiliki pengaruh sekitar 1,7 dan 2,62 kali lipat untuk AISI 304 dan AISI 2205, masing-masing, yang lebih penting daripada faktor peringkat kedua (kecepatan potong). Laju pemakanan tampaknya tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada umur pahat.

Ammouri dkk, 2011, dalam tulisan ilmiahnya mengatakan bahwa seiring berjalannya proses pengeboran, terjadi keausan pada alat potong yang menyebabkan pahat bor berubah dari kondisi tajam, menjadi kondisi yang sudah sebagian aus, dan akhirnya menjadi kondisi tumpul atau aus habis. Kegagalan yang sangat parah terjadi saat pengeboran dilakukan dengan menggunakan alat yang tumpul. Keausan pada pahat bor terjadi di semua bagian yang bersentuhan dengan logam saat pengeboran. Namun, dari banyak jenis keausan yang diteliti, keausan sisi, VB, merupakan yang paling umum dalam literatur pemotongan logam. Meskipun banyak metode yang digunakan untuk mengukur keausan sisi, termasuk mengambil rata-rata jarak keausan pada lokasi tertentu di bibir bor, penelitian ini menggunakan VB maksimum, VBmax, di titik di mana bibir bertemu dengan tepi dan kecepatan potong paling tinggi.

Banyak faktor yang mempengaruhi keandalan proses pemesinan. Salah satunya adalah keausan pahat atau alat potong dan peningkatan suhu yang dialami oleh pahat. Faktor-faktor ini memiliki dampak signifikan pada umur dan kinerja pahat (El-Hofy, 2013).

Dari beberapa penjelasan di atas, dapat disimpulkan bahwa telah banyak penelitian yang mengamati hubungan antara respon pemesinan dengan faktor atau parameter pemesinan, baik *single response* maupun *multi responses*. Penelitian optimisasi multi-respon sangat berguna untuk menentukan kombinasi optimal dari setiap parameter pemesinan, sehingga dengan satu kali percobaan dapat mencapai optimisasi beberapa respon sekaligus. Hal ini memiliki peran penting dalam industri manufaktur untuk meningkatkan efisiensi produksi. Oleh karena itu, penelitian yang akan dilakukan oleh penulis bertujuan untuk menentukan kondisi optimal proses pemesinan *drilling* pada material paduan Stainless steel 316L dengan mengamati dua respon, yaitu jumlah lubang dan kekasaran permukaan benda kerja. Jumlah lubang akan dihitung berdasarkan progres kondisi pahat selama proses pemesinan hingga dinyatakan aus. Parameter yang akan diamati meliputi diameter pahat, kecepatan spindle, feeding, dan sudut ujung pahat. Metode yang akan digunakan adalah kombinasi dari Metode Taguchi dan GRA. Dengan kata lain, penelitian ini akan mencari kondisi optimum dari empat faktor pemesinan untuk mencapai jumlah lubang maksimal dan kekasaran permukaan benda kerja minimal.

1.2 Hipotesa

Hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter-parameter yang berpengaruh signifikan terhadap jumlah lubang adalah diameter pahat, feeding dan sudut ujung pahat.
2. Parameter-parameter kecepatan spindle dan feeding akan berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan.

3. Parameter sudut ujung pahat merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap kedua respon jumlah lubang dan kekasaran permukaan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis faktor-faktor dan parameter mempengaruhi respon jumlah lubang dan kekasaran permukaan menggunakan metode Taguchi.
2. Mencari kondisi optimum faktor dan parameter pada kedua respon secara bersama menggunakan metode Taguchi GRA.

1.4 Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan yang terjadi berkaitan dengan penelitian, ada beberapa hal yang menjadi batasan yaitu:

- 1.4.1 Pemesinan akan dilakukan pada kondisi pemesinan kering (*dry machining*).
- 1.4.2 Sudut ujung pahat yang digunakan adalah berdasarkan ketersediaan yang ada di pasaran, sedangkan sudut ujung pahat yang tidak tersedia di pasaran dilakukan pembentukan sudut acuan *angle gauge* sesuai sudut yang diperlukan.
- 1.4.3 Nilai level dari masing-masing faktor akan disesuaikan dengan hasil perhitungan dan kemampuan mesin *milling* CNC yang akan digunakan untuk percobaan, yaitu mesin *milling* CNC yang ada di Laboratorium Pemesinan Politeknik Tunas Garuda Sugar Group Companies Lampung.

- 1.4.4 Pahat yang dipakai HSS merk Nachi dengan diameter pahat 4 mm, 6 mm dan 8 mm.
- 1.4.5 Kecepatan spindle yang dipakai adalah 597, 796 dan 1194 rpm
- 1.4.6 Feeding yang dipakai adalah 30 mm/menit, 38 mm/menit dan 46 mm/menit
- 1.4.7 Sudut ujung pahat adalah 90° , 118° dan 135° .

1.5 Sistematika Penulisan

BAB 1 PENDAHULUAN: Latar Belakang, Hipotesa, Tujuan Penelitian, Batasan Masalah, Sistematika Penulisan.

BAB 2 LANDASAN TEORI: Pemesinan, Proses *Drilling*, Stainless Steel 316L dan Proses Pemesinan, Keausan Pahat, Kekasaran Permukaan, Metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis* (GRA)

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN: Tempat Penelitian, Bahan, Peralatan, Desain Eksperimen, Penentuan Faktor dan Level, Pengambilan Data Pengujian, Pengolahan Data, Diagram Alir Penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN: Menjelaskan data hasil pengujian, Mencari SN Ratio dan Anova Tiap Faktor, Analisis Multirespon dengan metode Taguchi – Grey Relational Analysis, Pengujian Konfirmasi dan Pembahasan hasil Perhitungan dengan metode Grey Relational Analysis.

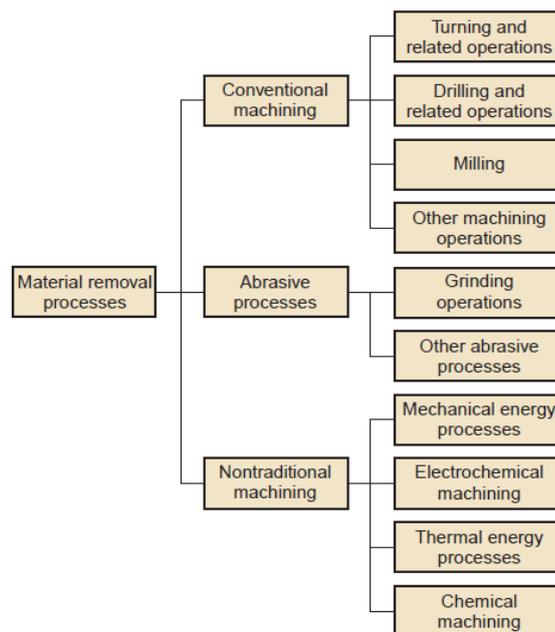
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN: menjelaskan kesimpulan dari bab sebelumnya dan memberikan saran untuk penelitian yang akan dilaksanakan kemudian hari.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemesinan

Pemesinan adalah proses manufaktur menggunakan alat potong yang tajam untuk pemotongan bahan menjadi bentuk yang dikehendaki. Tindakan pemotongan yang umum dalam pemesinan adalah menghilangkan bagian bahan dan menyisakan bagian yang diinginkan, melibatkan deformasi geser benda kerja untuk membentuk geram. Pemesinan atau proses penghilangan bahan ini paling sering diterapkan untuk membentuk logam. (Groover, 2013).

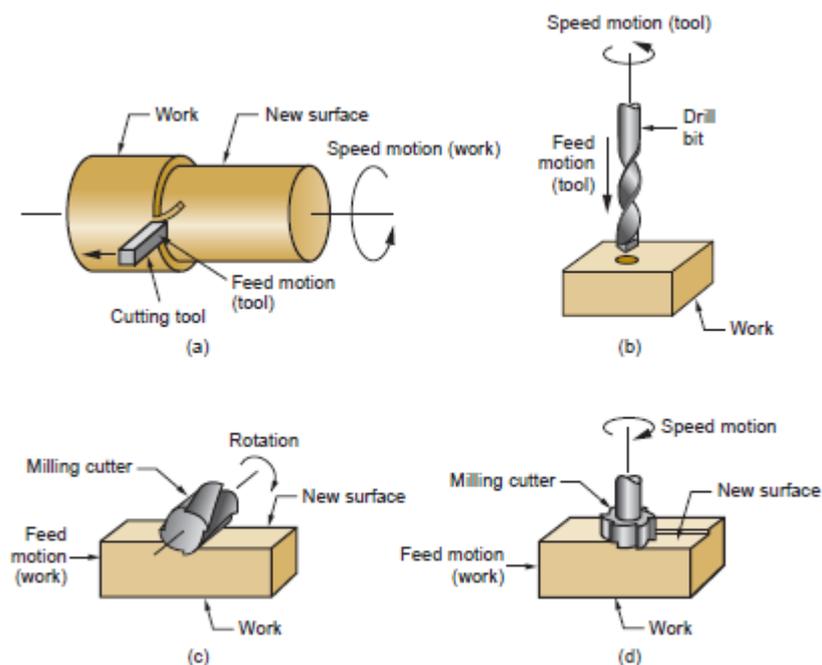
Untuk lebih jelas mengenai jenis-jenis pemesinan yang ada sekarang dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Groover, 2013).



Gambar 2. 1 Klasifikasi proses pemesinan

Beberapa alasan mengapa pemesinan begitu penting secara komersial dan teknologi, diantaranya karena pemesinan dapat mengerjakan bahan yang beragam. Hampir semua logam padat dapat dikerjakan dengan mesin. Berbagai macam bentuk geometris dapat dicapai dengan proses ini, dari yang sederhana hingga bentuk yang rumit. Selain itu, akurasi dimensi dan *surface finish* yang baik dapat dicapai.

Beberapa contoh operasi pemesinan yang paling umum dilakukan adalah proses bubut, milling dan drilling, dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Groover, 2013).



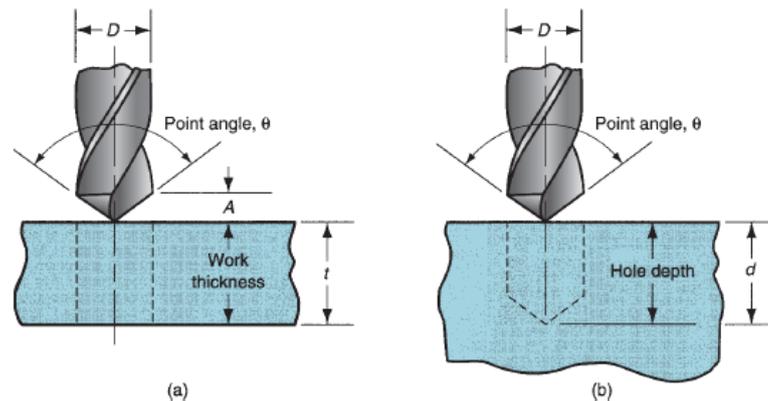
Gambar 2. 2 Beberapa proses pemesinan yang paling umum

2.2 Proses gurdi

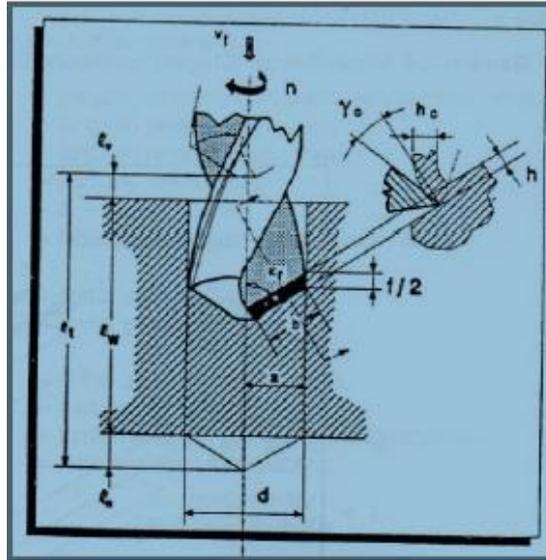
Proses gurdi atau penggurdian adalah proses pembuatan lubang bulat dengan menggunakan mata bor (*twist drill*). Sedangkan proses bor (*boring*) adalah proses meluaskan/ memperbesar lubang. Proses *drilling* memiliki karakteristik yang agak berbeda dengan proses pemesinan yang lain, diantaranya yang adalah

geram harus keluar dari lubang yang dibuat. Dan geram yang keluar dapat menyebabkan masalah ketika ukurannya besar dan atau kontinyu. Selain itu proses pembuatan lubang bisa menjadi lebih sulit jika lubang yang dibuat berukuran cukup dalam. Sedangkan gurdi adalah sebutan untuk sebuah pahat pemotong yang ujungnya berputar dan memiliki satu atau beberapa sisi potong dan galur yang berhubungan *continue* disepanjang badan gurdi. Galur ini, yang dapat lurus atau heliks, disediakan untuk memungkinkan lewatnya serpihan atau *cutting fluid*. (Kalpakjian, 2002).

Proses penggurdian atau *drilling* adalah proses di mana mata bor atau pahat gurdi berputar masuk ke benda kerja diam untuk membentuk lubang yang diameternya sama dengan diameter pahat. Proses ini biasanya dilakukan pada mesin bor, tetapi mesin lainnya dapat mengerjakan proses ini, seperti mesin *milling*. Tipe dan proses penggurdian dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 (Dwijayanti, 2017).



Gambar 2. 3 Tipe lubang (a) through hole (b) blind hole



Gambar 2. 4 Proses penggurdian

2.3 Proses *drilling* pada mesin *milling* CNC

Milling adalah proses pemesinan yang mempunyai alat potong yang bergerak berputar / rotary dengan benda kerja yang mempunyai gerakan lurus. Selama proses *milling* proses pemotongan yang terjadi oleh tiap gigi di alat potong akan menghasilkan *chip* / geram (El-Hofy, 2013).

Mesin *milling* adalah salah satu alat mesin yang paling serbaguna, memiliki berbagai kemampuan pemotongan logam. Banyak operasi rumit dapat dilakukan pada mesin *milling* (Kalpakjian, 2002).

Mesin Milling CNC atau biasa disebut Frais merupakan salah satu jenis perangkat mesin CNC yang paling umum dipakai di perindustrian. Mesin Milling CNC sendiri yaitu mesin milling yang pengaturan pergerakan meja dan spindlenya dikontrol melalui program tertentu. Program itu berupa perintah-perintah khusus dengan bahasa numerik yang harus dikerjakan oleh mesin CNC. Hal tersebutlah yang membedakan mesin milling CNC dengan mesin milling

konvensional, karena pergerakan dan perputaran pada milling konvensional masih dilakukan manual dengan tangan.

Fungsi utama mesin Milling CNC adalah untuk pengeboran dan pemotongan material. Jadi, jika material bahan sudah dimasukkan ke dalam mesin maka program komputer akan mengendalikan mesin untuk memotong atau mengebor material tersebut sesuai yang diharapkan. Mesin memiliki ketersediaan pilihan sumbu mulai dari tiga sampai 6 sumbu sehingga arah pergerakannya fleksibel dan bisa disesuaikan.

Secara garis besar, klasifikasi mesin Milling CNC dibedakan berdasarkan dua variabel yaitu fungsi dan jumlah sumbu. Berikut ini pemaparannya. Mesin Milling CNC berdasarkan fungsi:

1. Mesin Frais Training Unit (TU)

Jenis yang pertama yaitu Training Unit (TU) yang fungsi utamanya untuk keperluan pelatihan atau pendidikan di instansi sekolah maupun lembaga pelatihan. Tipe mesin Milling TU yang biasa dipakai oleh kalangan pelatihan yaitu Edumill, Emco, GSK.

2. Mesin Frais Production Unit (PU)

Selanjutnya adalah jenis Production Unit (PU) yang penggunaannya untuk membantu proses produksi di perindustrian. Mesin Frais PU yang populer digunakan adalah mesin bermerk Mitsubishi, Fanuc, Siemens, dan lain-lain. Sedangkan Mesin Milling CNC berdasarkan jumlah sumbu dapat dibedakan menjadi:

1. Milling CNC 3 Axis

Jenis yang sering digunakan adalah Milling CNC yang beroperasi dengan tiga sumbu yakni X, Y, dan Z. Hal ini memungkinkan mesin pemotong untuk bergerak ke tiga arah.

2. Milling CNC 5 Axis

Mesin Milling CNC 5 sumbu tidak hanya berotasi pada X, Y, dan Z namun juga sumbu B dan W. Fitur ini berguna sekali dalam menjaga agar alat pemotong stabil dan tetap tegak di bidang permukaan material. Dengan begitu Anda bisa mengebor atau memotong dalam posisi menggantung, hal yang tidak bisa dilakukan dengan tiga sumbu.

3. Milling CNC 6 Axis

Mesin Milling CNC dengan 6 sumbu memiliki tambahan sumbu rotasi yang terletak di sekitar sumbu Z. Kondisi ini menyebabkan tingkat kecepatan mesin jauh lebih tinggi dibanding yang 5 sumbu.

Mesin CNC Milling secara umum dibedakan menjadi 3 bagian, yakni komponen mekanik, komponen elektrik, dan komponen controller. Berikut ini penjelasan singkatnya:

1. **Komponen Mekanik;** bagian mekanik adalah komponen yang fungsinya seputar pergerakan dan perputaran mesin. Terdiri dari spindle, meja kerja, eretan, dll.
2. **Komponen Elektrik;** bagian elektrik tentu saja adalah komponen mesin yang berfungsi memberikan tenaga atau energi untuk komponen mekanik agar bisa melakukan pergerakan sesuai yang diperintahkan controller.

Terdiri dari motor servo, *spindle driver*, motor listrik utama, *power supply*, dsb.

3. Komponen Controller

Sesuai sebutannya, komponen yang terakhir ini merupakan bagian dalam mesin yang fungsinya mengontrol keseluruhan kerja mesin atau singkatnya sebagai otak mesin CNC. Komponen inilah yang membedakan mesin Milling CNC dengan mesin Milling konvensional. Merk atau tipe controller pada mesin kebanyakan tergantung dari produsen pembuatnya misal merk Mitsubishi, Fagor, GSK, Sinumeric dan lain-lain.

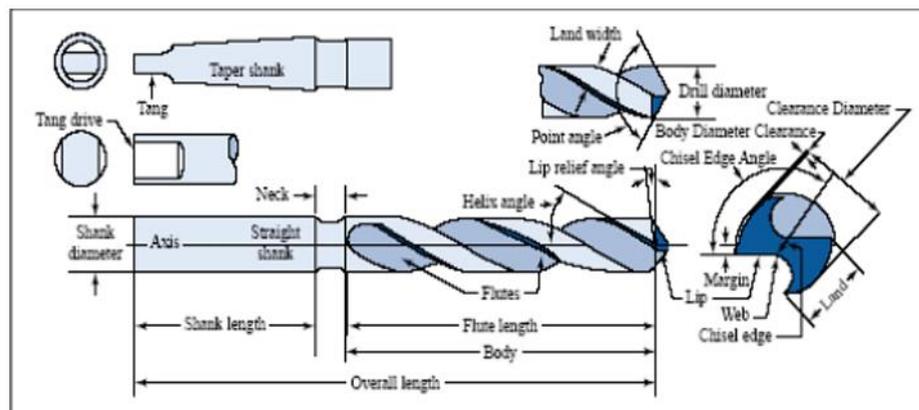
Teknologi digital dan mesin Milling CNC memungkinkan penyelesaian banyak masalah yang tidak dapat diselesaikan dengan mudah menggunakan metode sebelumnya. Teknologi mendekati proses kerja dengan cara yang lebih efektif dan efisien.

Misalnya, tanpa mesin milling CNC, proses pemotongan logam untuk suku cadang mobil atau bahkan komponen luar angkasa akan jauh lebih berisiko. Dengan dukungan program komputer, seseorang dapat mengakses dan membuat desain definisi tinggi yang dengan mudah diubah menjadi koordinat Cartesian. Proses ini bahkan membantu menurunkan biaya pembuatan prototipe.

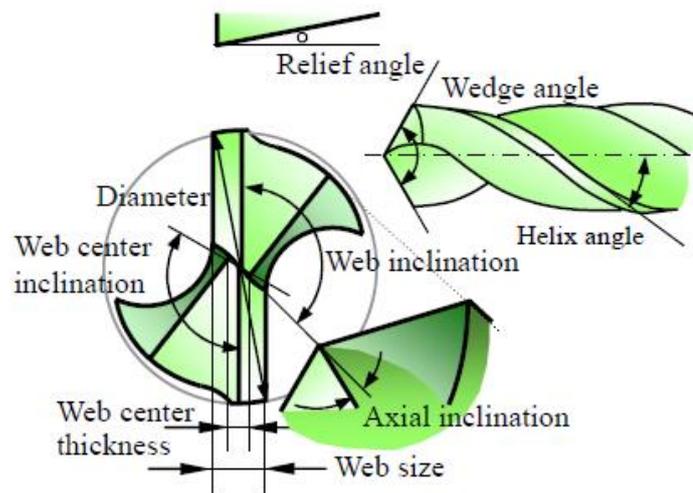
Tetapi mesin teknologi ini tidak hanya untuk keperluan industri. Area lain termasuk furnitur, instrumen, dan patung. Ada juga berbagai bahan padat (keras dan lunak) yang dapat dipotong oleh mesin penggilingan CNC, termasuk aluminium, titanium, tembaga, perunggu, PVC, nilon, dan kayu lapis (Febriati, 2023).

2.4 Pahat gurdi atau mata bor

Pahat gurdi atau mata bor adalah sebuah alat potong yang ujungnya berputar (*twist*) dan 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 2.2. 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 2.5 menunjukkan bagian-bagian twist drill (Dwijayanti, 2017). Detail sudut bagian pemotong pada twist drill pada Gambar 2.6 (Matsumura, 2010).



Gambar 2. 5 Bagian-bagian pahat twist drill



Gambar 2. 6 Twist Drill (Matsumura, 2010)

Bagian-bagian utama dari *twist drill* adalah *body* (badan pahat), *point* (bagian ujung yang runcing), dan *shank* (tangkai). *Twist drill* dapat diklasifikasikan menurut materialnya, jenis tangkainya, jumlah *flute*, ukuran diameter dan geometri pahatnya. Menurut Tragedi, 2010, berdasarkan jenis tangkainya, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai menjadi; 1. *Straight shank drill*, jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk silinder. 2. *Taper shank drill*, jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk *taper*, yang sesuai untuk dipasang langsung pada spindel mesin. Sedangkan berdasarkan jumlah *flute*, *twist drill* dapat diklasifikasikan; 1. *Single flute drill*, pahat ini mempunyai satu *flute* dan digunakan untuk proses drill pada material plastik. 2. *Two flute drill*, pahat ini merupakan tipe *drill* konvensional. 3. *Three flute drill*, pahat ini merupakan tipe *twist drill* yang relatif baru dikembangkan pada proses pemotongan logam (*metalcutting*).

2.5 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:

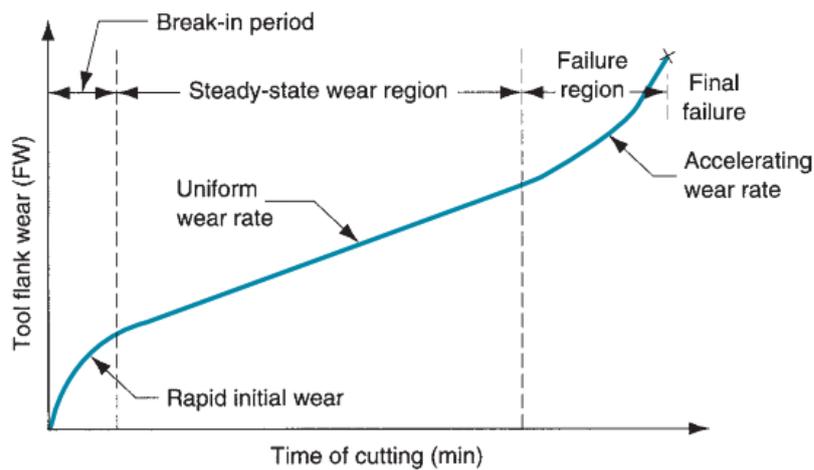
1. Keausan abrasi: Merupakan tindakan mekanis yang terjadi karena partikel keras dalam bahan kerja menggores dan menghilangkan sebagian kecil dari alat. Abrasi ini terjadi pada keausan sisi datar dan keausan kawah, menjadi penyebab utama keausan sisi datar.
2. Keausan adhesi: terjadi ketika dua logam 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).

2.6 Umur pahat dan persamaan umur pahat Taylor

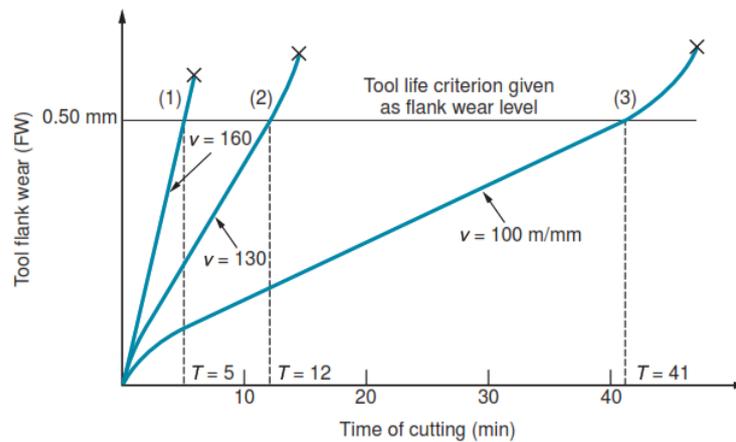
Ketika proses pemotongan berlangsung, beragam mekanisme keausan menyebabkan peningkatan keausan pada alat pemotong. Hubungan umum antara keausan alat dan waktu pemotongan dapat dilihat dalam Gambar ???. Meskipun gambar tersebut menggambarkan hubungan untuk keausan sisi datar, pola yang serupa terjadi pada keausan kawah. Dalam umumnya, terdapat tiga wilayah yang dapat diidentifikasi dalam kurva pertumbuhan keausan. Wilayah pertama adalah periode penyesuaian, di mana tepi potong yang tajam mengalami keausan yang cepat pada awal penggunaannya, terutama dalam beberapa menit pertama pemotongan. Periode penyesuaian diikuti oleh keausan yang terjadi pada tingkat yang relatif stabil, dikenal sebagai wilayah keausan pada keadaan tetap. Meskipun

dalam gambar kurva ini digambarkan sebagai fungsi linear terhadap waktu, sebenarnya terdapat deviasi dari garis lurus dalam situasi pemotongan yang sebenarnya. Selanjutnya, keausan mencapai tingkat di mana laju keausan mulai meningkat. Ini menandai awal wilayah kegagalan, di mana suhu pemotongan lebih tinggi, dan efisiensi umum dari proses pemotongan berkurang. Jika dibiarkan terus berlanjut, akhirnya alat akan mengalami kegagalan karena suhu yang tinggi (Groover, 2002).



Gambar 2. 7 Keausan alat sebagai fungsi dari waktu pemotongan

Keausan sisi datar (FW) digunakan di sini sebagai ukuran keausan pahat. Keausan kawah mengikuti kurva pertumbuhan yang serupa, dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Groover, 2002).



Gambar 2. 8 Pengaruh cutting speed terhadap flank wear

Kemiringan kurva keausan alat pada wilayah keadaan tetap dipengaruhi oleh jenis bahan kerja dan kondisi pemotongan. Material kerja yang lebih keras akan meningkatkan laju keausan (kemiringan kurva keausan alat). Efek serupa terjadi ketika kecepatan, umpan, dan kedalaman potongan ditingkatkan, di mana kecepatan menjadi faktor yang paling berpengaruh di antara ketiganya. Jika kita menggambarkan kurva keausan alat untuk beberapa kecepatan potongan yang berbeda, hasilnya akan menunjukkan pola seperti yang terlihat dalam Gambar 9. Peningkatan kecepatan potongan menyebabkan laju keausan meningkat, sehingga tingkat keausan yang sama tercapai dalam waktu yang lebih singkat.

Umur alat didefinisikan sebagai durasi waktu pemotongan yang dapat dimanfaatkan oleh alat. Salah satu cara untuk mendefinisikan umur alat adalah dengan mengoperasikan alat hingga mencapai kegagalan kritis terakhir, seperti yang terlihat pada akhir setiap kurva keausan alat dalam Gambar 9. Namun, dalam konteks produksi, seringkali tidak menguntungkan untuk terus menggunakan alat hingga terjadi kegagalan ini karena kesulitan dalam mengasah kembali alat dan masalah kualitas permukaan kerja. Sebagai alternatif, tingkat keausan alat dapat

dijadikan kriteria umur alat, dan alat dapat diganti ketika tingkat keausan mencapai batas tertentu. Sebagai kriteria umur alat yang praktis, nilai keausan sisi datar tertentu, seperti 0,2 mm, dapat dipilih, seperti yang ditunjukkan oleh garis horizontal dalam grafik. Ketika setiap dari tiga kurva keausan memotong garis tersebut, umur alat yang bersangkutan dianggap telah berakhir. Jika titik potong tersebut diproyeksikan ke bawah ke sumbu waktu, nilai umur alat dapat diidentifikasi, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Taylor Tool Life Equation jika nilai umur alat untuk tiga kurva keausan dalam Gambar 2.7 digambarkan pada grafik logaritma natural dari kecepatan potongan versus umur alat, hubungan yang dihasilkan adalah garis lurus, seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.

Penemuan hubungan ini, yang dilakukan sekitar tahun 1900, dikemukakan F. W. Taylor. Ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan dan dikenal sebagai

Persamaan Umur Pahat Taylor:

$$V.T^n = C$$

Di mana:

V = kecepatan potongan,

T = umur pahat

n = eksponen yang mencerminkan hubungan antara kecepatan potongan dan umur pahat

C = konstanta

Persamaan ini membantu memodelkan dan memahami hubungan antara kecepatan potongan dan umur alat dalam proses pemotongan (Groover, 2002).

Metode pemantauan keausan pahat dapat dilakukan dengan dua cara yaitu pengamatan langsung (*direct tool monitoring*) dan pengamatan tidak langsung (*indirect monitoring*). (Kalpakjian dan Schmid 2002).

a. Pengamatan langsung.

Pemantauan langsung merupakan pemantauan pengukuran secara optikal mikroskopik. Kondisi aus pahat potong diamati secara periodik. Bentuk pengikisan sisi serta kawah pahat diamati. Alat yang digunakan adalah mikroskop atau SEM. Pengamatan dilakukan pada kondisi pemotongan yang dihentikan pada interval waktu tertentu melihat profil kerusakan pahat secara periodik (Kalpakjian dan Schmid, 2002).

b. Pengamatan tidak langsung.

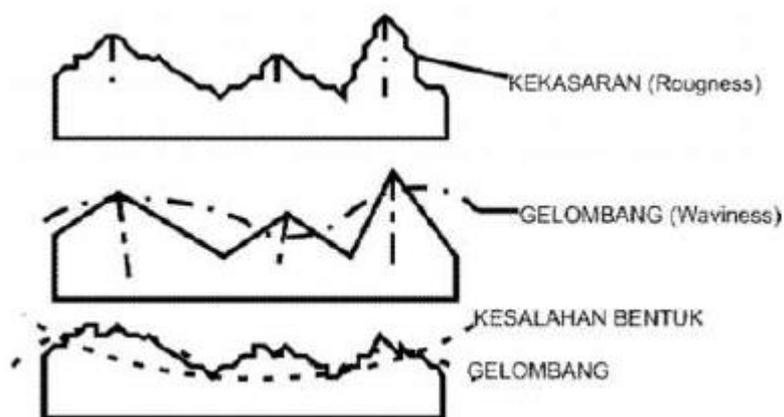
Pengamatan tidak langsung adalah pengukuran aus pahat yang dipengaruhi oleh hubungan antara kondisi pahat dengan variabel gaya potong, daya, panas yang terjadi dan getaran. Metode lain menggunakan teknik pemantauan arus listrik dan sinyal derau (*noise*).

2.7 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan adalah penyimpangan rata-rata aritmetik dari garis rata-rata permukaan. Dalam dunia industri, permukaan benda kerja memiliki nilai kekasaran permukaan yang berbeda, sesuai dengan kebutuhan dari penggunaan alat tersebut. Pada nilai kekasaran permukaan terdapat beberapa kriteria nilai kualitas (N) yang berbeda, dimana nilai kualitas kekasaran permukaan tersebut telah diklasifikasikan oleh ISO. Nilai kualitas kekasaran permukaan terkecil dimulai dari N1 yang memiliki nilai

kekasaran permukaan (R_a) 0,025 μm dan nilai yang paling tinggi adalah N12 dengan nilai kekasarannya 50 μm (Azhar dkk, 2014).

Permukaan adalah suatu batas yang memisahkan benda padat dengan sekitarnya. Istilah lain yang berkaitan dengan permukaan yaitu profil. Profil atau bentuk adalah garis hasil pemotongan secara normal atau serong dari suatu penampang permukaan. Bentuk dari suatu permukaan dapat dibedakan menjadi dua yaitu permukaan yang kasar (*roughness*) dan permukaan yang bergelombang (*waviness*). Permukaan yang kasar berbentuk gelombang pendek yang tidak teratur dan terjadi karena getaran pisau (pahat) potong atau proporsi yang kurang tepat dari pemakanan (*feed*) pisau potong dalam proses pembuatannya. Sedangkan permukaan yang bergelombang mempunyai bentuk gelombang yang lebih panjang dan tidak teratur yang dapat terjadi karena beberapa faktor misalnya posisi *center* yang tidak tepat, adanya gerakan tidak lurus (*non linier*) dari pemakanan (*feed*), getaran mesin, tidak seimbang batu gerinda, perlakuan panas (*heat treatment*) yang kurang baik, dan sebagainya. Dari kekasaran (*roughness*) dan gelombang (*waviness*) inilah kemudian timbul apa yang disebut dengan kesalahan bentuk, ditunjukkan pada Gambar 2.9 (Munadi, 1988).



Gambar 2. 9 Kekasaran, gelombang dan kesalahan bentuk

Kekasaran permukaan benda kerja hasil pemesinan dipakai dalam dunia industri untuk mengukur tingkat kehalusan permukaan benda kerja yang dihasilkan. Pada tahun 1947, di Amerika dibuat standar tentang kekasaran yaitu *American Standard B46.1-1947*.

Narayana, 2006 dalam tulisannya bahwa kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakteraturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Hal ini terjadi karena adanya berbagai penyimpangan selama proses pemesinan, sehingga permukaan yang mempunyai bentuk sempurna tidak dapat dibuat. Posisi Ra, bentuk profil, panjang sampel dan panjang pengukuran yang dibaca oleh alat ukur kekasaran permukaan. Sifat-sifat geometris suatu permukaan meliputi; penyimpangan makro, gelombang permukaan dan ketidakteraturan mikro.

Kamdani dkk, 2018 melakukan penelitian proses *drilling* terhadap material stainless steel 316L, meneliti pengaruh sudut helix terhadap kekasaran permukaan. Dengan variasi sudut heliks 15° , 30° dan 40° , mendapat kesimpulan bahwa semakin besar sudut heliks berpengaruh pada meningkatnya kekasaran permukaan.

Bhole dkk, 2016 dalam penyelidikan eksperimental dilakukan untuk memprediksi kekasaran Stainless steel 316L pada operasi pengeboran. ditemukan bahwa kecepatan potong dan laju pemakanan berpengaruh terhadap kekasaran permukaan.

2.8 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 orthogonal 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 (rasio 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:

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

Dimana:

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

m = nilai target spesifikasi

2.9 *Grey Relational Analysis (GRA)*

GRA (Grey Relational Analysis) 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 gaya potong, masa pakai dan kekasaran permukaan.
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.

2.10 Langkah Pendekatan GRA

Langkah pendekatan melakukan analisa dengan memakai GRA dengan dibantu 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:

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

Diman:

$X_i^*(j)$ = 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 $\Delta o_i(j)$ yang merupakan nilai absolut dari selisih antara nilai maksimum hasil normalisasi $X_o^*(j)$ dengan data yang telah dinormalisasi $X_i^*(j)$ pada titik j.

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\Delta o_i(j) = |X_o^*(j) - X_i^*(j)| \dots \dots \dots \text{Pers. 2.5}$$

Dimana:

$Xo^*(j) = 1$ (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:

Δ_{min} = nilai minimum dari $\Delta_{oi(j)}$

Δ_{maks} = nilai maksimum dari $\Delta_{oi(j)}$

ζ = koefisien 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

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

Sedangkan:

a_{11} : nilai pertama dari vektor eigen 1

a_{12} : nilai kedua dari vektor eigen 1

λ_k : 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) :

$$\hat{y} = \gamma_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \dots \dots \dots \text{Pers. 2. 8}$$

Dimana:

\hat{y} = 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

2.11 ANOVA (Analysis of Variance)

ANOVA (Analysis of Variance) 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:

1. Menentukan derajat bebas total, error dan setiap faktor

Tabel 2. 1 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	db _e	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}) = $dB_T - dB_A - dB_B - dB_C - dB_D$

2. Menghitung jumlah kuadrat total, error dan setiap faktor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Uji pengaruh (Uji F)

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

Hipotesis:

$H_0 = A_1 = A_2 = A_3 = 0$ (tidak terdapat efek dari faktor A)

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

Berlaku juga untuk faktor B, C dan D

Dengan $\alpha =$ 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 3 METODOLOGI PENELITIAN

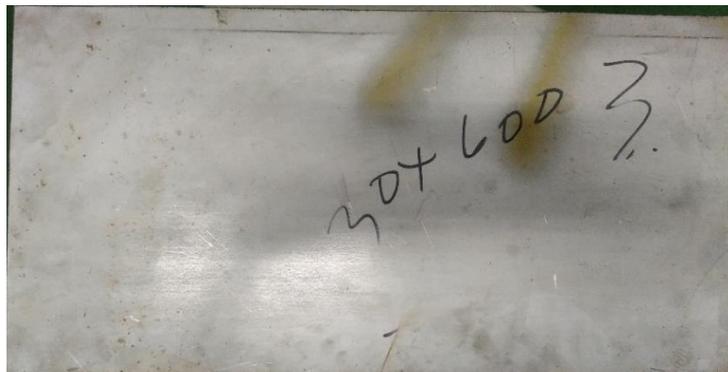
3.1 Tempat Penelitian

Eksperimen penelitian proses pemesinan *drilling* dilakukan di Laboratorium Manufaktur Politeknik Tunas Garuda Sugar Group Companies Lampung dan pengujian hasil eksperimen berupa kekasaran permukaan dilakukan di Laboratorium Metrologi Universitas Lampung.

3.2 Bahan

3.2.1 Stainless steel 316 L

Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan paduan Stainless Steel 316 L dengan bentuk pelat dengan ketebalan 6 mm, Panjang 600 mm dan lebar 300 mm, gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Pelat Stainless Steel 316L

Stainless steel 316 L didesain berdasarkan pada stainless steel 302, di mana ketahanan korosinya ditingkatkan dengan menambahkan 2,0–3,0% massa Mo, kandungan Ni ditingkatkan dari 8,0–10,0% massa menjadi 12,0–15,0%

massa, sedangkan kandungan karbon (C) dikurangi menjadi $<0,030\%$. (Ilevbare dan Burstein, 2001).

Menurut Hafizi, 2016 kandungan kimia stainless steel 316 L terdiri dari C 0,02%, Cr 17,2%, Ni 10,1%, Mo 2,1% dan Fe $< 70\%$.

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). Komposisi kimia dari paduan Stainless Steel 316L dapat dilihat pada table 3.1.

Tabel 3. 1 Komposisi kimia paduan stainless steel 316 L (Bhole, 2016)

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

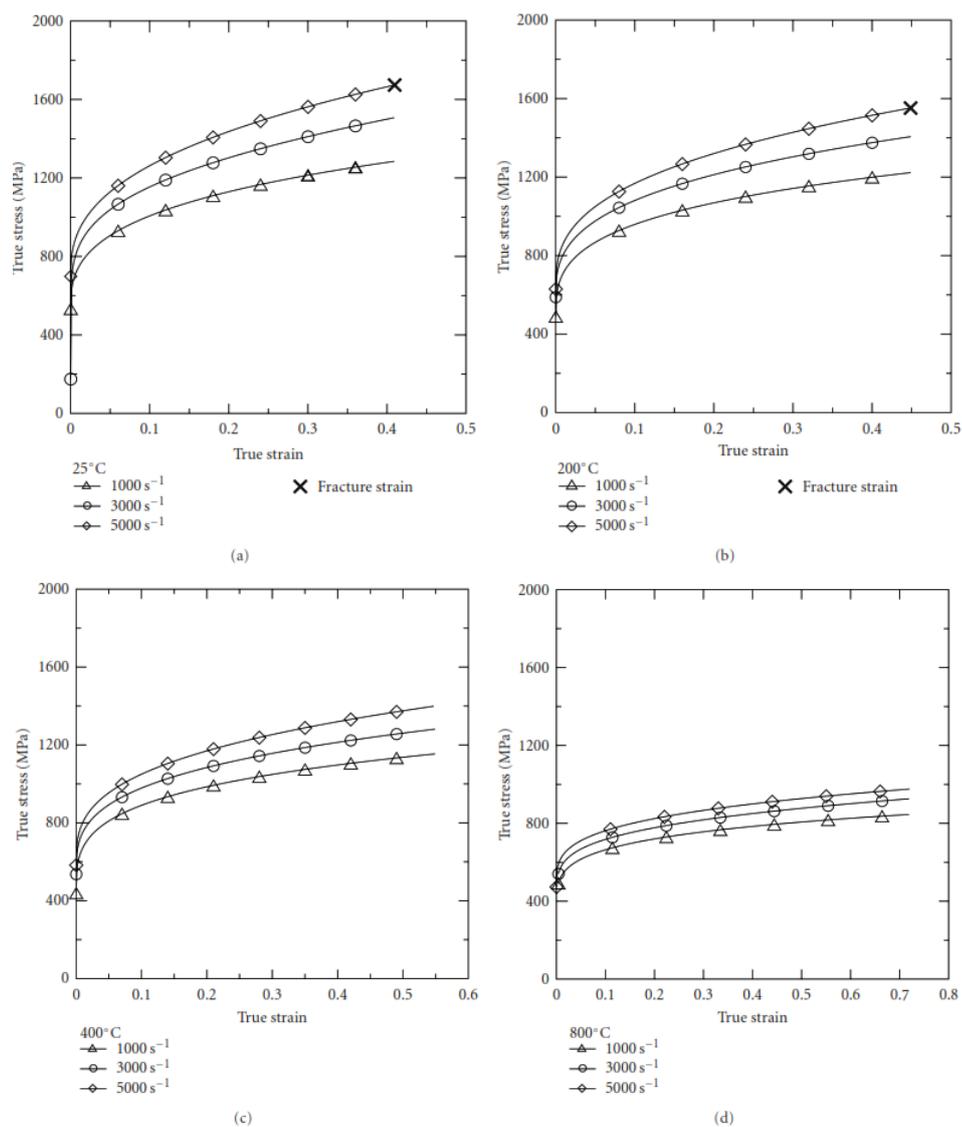
Sedangkan untuk sifat mekanik dari paduan Stainless Steel 316 dapat dilihat pada table 3.2 di bawah ini:

Tabel 3. 2 Sifat mekanis Stainless steel 316L (Bhole, 2016)

AISI 316L Mechanical Properties	
Max Stress	450 Mpa
Yield Stress	170 Mpa
Elongation	40%
Hardness	217 Brinel

Lee dkk, 2011, mengamati perilaku mekanis dan kurva tegangan-regangan dari spesimen 316L SS sebagai fungsi dari laju regangan pada suhu deformasi

masing-masing 25°C, 200°C, 400°C, dan 800°C. Secara umum, gambar-gambar tersebut menunjukkan bahwa untuk semua nilai suhu deformasi, tegangan alir (flow stress) tergantung pada regangan maupun laju regangan. Secara khusus, untuk laju regangan yang konstan, tegangan alir meningkat secara perlahan dengan bertambahnya regangan, sementara untuk regangan yang konstan, tegangan alir meningkat secara perlahan dengan bertambahnya laju regangan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini (Lee dkk, 2011).



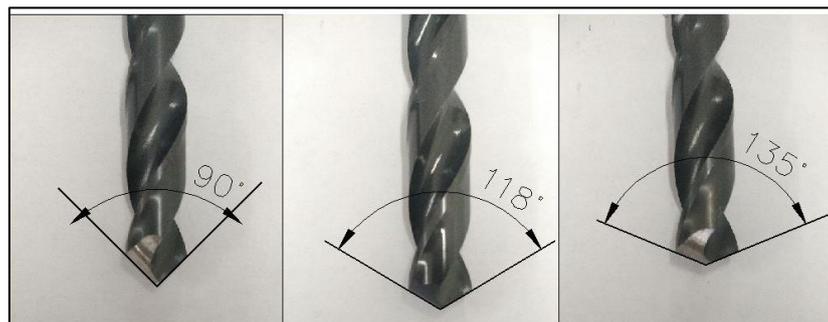
Gambar 3. 2 Kurva tegangan-regangan material Stainless steel 316L

3.2.2 Pahat gurdi / *twist drill*

Alat potong yang digunakan adalah pahat gurdi jenis *twistdrill* HSS dengan merk NACHI, direncanakan terdiri dari tiga diameter yaitu 4, 6 dan 8 mm. Pahat gurdi HSS merupakan paduan dari 0,75% - 1,5% Carbon (C), 4% - 4,5% Chromium (Cr), 10% - 20% Wolfram (W) dan Molybdenum (Mo), 5% lebih Vanadium (V), dan Cobalt (Co) lebih dari 12% (Childs, et.al. 2000).

Berikut adalah spesifikasi lengkap mengenai pahat gurdi yang akan digunakan:

Merk dagang	= Nachi
Kode	= BO821, BO844, BO816
Material	= HSS Standard LIST 500
Tipe	= Standard Parallel Shank Twist Drill
Jumlah flute	= 2 buah
Sudut <i>twist</i>	= 30°
Sudut bebas samping	= 19°
Diameter	= 4 mm, 6 mm, 8 mm
Panjang alur	= 43 mm, 70 mm, 80 mm
Panjang total pahat	= 73 mm, 102 mm, 117 mm
Toleransi diameter pahat	= H8



Gambar 3. 3 Twist Drill HSS merk NACHI

3.3 Peralatan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1 Peralatan

a. Mesin *milling* CNC

Mesin *milling* CNC yang digunakan adalah mesin CNC 3 axis dengan merk FEELER milik Laboratorium Manufaktur Politeknik Tunas Garuda Sugar Group Companies. Dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merk : FEELER

Tipe : VMP40

Jumlah axis : 3

Panjang axis x : 1000 mm

Panjang axis y : 500 mm

Panjang axis z : 600 mm



Gambar 3. 4 Mesin CNC Milling 3 axis Merk Feeler VMP40

b. Kamera mikroskop USB

Kamera Mikroskop USB digunakan memantau secara langsung kondisi pahat selama proses pemesinan. Proses pengambilan gambar dilakukan setiap menyelesaikan tiga lubang pada benda kerja stainless steel 316 L. Mikroskop USB ini memiliki pembesaran 20x-50x dan 200x. Dengan merk Dino-Lite AM2111 Series dengan feature sebagai berikut:

Adjustable magnification	: 20x-50x, 200x
Resolution	: 640x480
Frame rate	: Up to 30fps
Interface	: USB 2.0
Dimension	: 10.5 cm (L) x 3.2 cm (D)
Unit Weight	: 100 gram



Gambar 3. 5 Kamera Mikroskop USB Merk DinoLite

c. *Surface Tester*

Surface tester digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan dari hasil pemesinan. *Surface tester* yang digunakan adalah merk Mitutoyo seri SJ201 yang memiliki standar pengukuran Ra, Rz, Rq dan ketelitian

hingga 0.01 μm . Pengukuran kekasaran permukaan didapat dari sinyal pergerakan *stylus* berbentuk diamond yang bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan. Prinsip kerjanya adalah dengan menggunakan *transducer* dan diolah dengan mikroprosesor. *Surface tester* yang dipakai mempunyai merk Mitutoyo seri SJ-201.



Gambar 3. 6 Surface Tester Merk Mitutoyo SJ201

d. *Magnetic holder*

Magnetic holder digunakan sebagai *holder* kamera mikroskop USB yang dilekakkan pada koordinat tertentu di atas meja kerja mesin milling CNC.



Gambar 3. 7 Magnetic Holder

e. Dial Caliper

Dial caliper adalah alat ukur yang digunakan dalam penelitian, digunakan untuk mengukur benda kerja dan keperluan-keperluan pengukuran lain dalam penelitian.



Gambar 3. 8 Dial Caliper Merk Mitutoyo

3.4 Desain Eksperimen

3.4.1 Penentuan faktor dan level

Penelitian yang akan dilakukan adalah proses pemesinan *drilling* dengan 4 faktor dengan 3 level dan 2 respon. Empat faktor tersebut adalah diameter pahat gurdi, kecepatan putaran spindle, feeding dan sudut ujung pahat. Dan variable

respon yang akan teliti adalah jumlah lubang dan kekasaran permukaan benda kerja. Besaran parameter yang ditetapkan pada faktor ujicoba pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Besaran parameter faktor percobaan

Kode	Parameter proses	Unit	Level / tingkatan		
			1	2	3
A	Diameter pahat	mm	4	6	8
B	Kecepatan spindel	rpm	1194	796	597
C	Feeding	mm/menit	46	38	30
D	Sudut ujung pahat	°	90	118	135

Pengujian ini akan menggunakan 4 faktor dengan 3 level serta mengamati 2 respon dengan dua kali pengulangan . Dengan bantuan *software* perhitungan didapatkan L_9 *orthogonal array* Tabel 3.4 berikut :

Tabel 3. 4 Orthogonal Array L9

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

Jika besaran level dimasukkan maka tabel percobaan akan menjadi sebagai berikut:

Tabel 3. 5 Orthogonal Array dengan besaran level

<i>RunOrder</i>	Diameter Pahat (mm)	Kec. <i>Spindle</i> (rpm)	Kec. <i>Feeding</i> (mm/menit)	Sudut Ujung Pahat (°)
1	4	1194	46	90
2	4	796	38	118
3	4	597	30	135
4	6	1194	38	135
5	6	796	30	90
6	6	597	46	118
7	8	1194	30	118
8	8	796	46	135
9	8	597	38	90

Diameter pahat yang digunakan dalam penelitian ini adalah 4 mm, 6 mm dan 8 mm. Kecepatan spindle pada 1194 rpm, 796 rpm dan 597, dimana kecepatan spindle ini penulis tetapkan berdasarkan hasil perhitungan nilai tengah *cutting speed* yang tertuang dalam tulisan Groover. Parameter Feeding 46 mm/menit, 38 mm/menit, 30 mm/menit penulis pilih mengacu penyesuaian kemampuan mesin yang digunakan untuk penelitian. Sedangkan sudut pahat yang digunakan adalah 90°, 118° dan 135°. Respon jumlah lubang (*Number of Hole*) didasarkan penghitungan jumlah lubang yang dicapai dalam proses pemesinan sampai kondisi pahat dinyatakan aus yakni VB 0,2 mm.

3.4.2 Pengambilan data pengujian

Respon yang akan diamati adalah jumlah lubang dan kekasaran permukaan benda uji pada proses pemesinan *drilling*. Adapun langkah pengambilan datanya adalah sebagai berikut :

- a. Mengukur dan mempersiapkan benda kerja stainless steel 316 L sebelum *setting* mesin.
- b. Melakukan *setting* benda kerja pada meja kerja mesin, memastikan pencekaman benar-benar kuat dan aman. Termasuk memberikan *softboard* sebagai alas benda kerja agar proses pelubangan tidak merusak meja mesin.



Gambar 3. 9 Setting pencekaman benda kerja

- c. Menentukan letak kamera mikroskop USB dalam koordinat yang terjangkau oleh pergerakan mesin dan menghubungkannya dengan komputer / laptop.



Gambar 3. 10 Setting kamera mikroskop USB

- d. Membuat program pemesinan dengan memasukkan besaran parameter yang sudah ditetapkan dalam rancangan Taguchi.
- e. Melakukan simulasi gerakan pemesinan sesuai program yang telah dibuat.
- f. Melakukan inspeksi dan evaluasi terkait safety secara menyeluruh terhadap proses simulasi pemesinan.
- g. Melakukan proses pemesinan yang sesungguhnya sebanyak 9 *run order* menggunakan pahat *twist drill* HSS merk Nachi pada benda kerja stainless steel 316 L sesuai dengan table 3.3.



Gambar 3. 11 Hasil Proses Pemesinan drilling

- h. Pengambilan gambar menggunakan kamera mikroskop USB dilakukan setiap 3 lubang. Artinya setiap gambar adalah tampilan progres keausan pahat untuk setiap kelipatan 3 jumlah lubang.
- i. Mengukur keausan pahat dilakukan dengan bantuan software Autocad. Dengan cara meng-*import* gambar tangkapan kamera, disesuaikan skala gambarnya menjadi 1:1. Kemudian diukur besar keausanya.
- j. Untuk kekasaran permukaan diukur setelah selesai semua proses pemesinan. Dari keseluruhan jumlah lubang setiap specimen diukur 3 kali, yaitu awal, tengah dan akhir, masing-masing pengukuran diulang 3 kali menggunakan *Surface Roughness tester*.



Gambar 3. 12 Pengukuran kekasaran permukaan menggunakan
Surface Roughness Tester

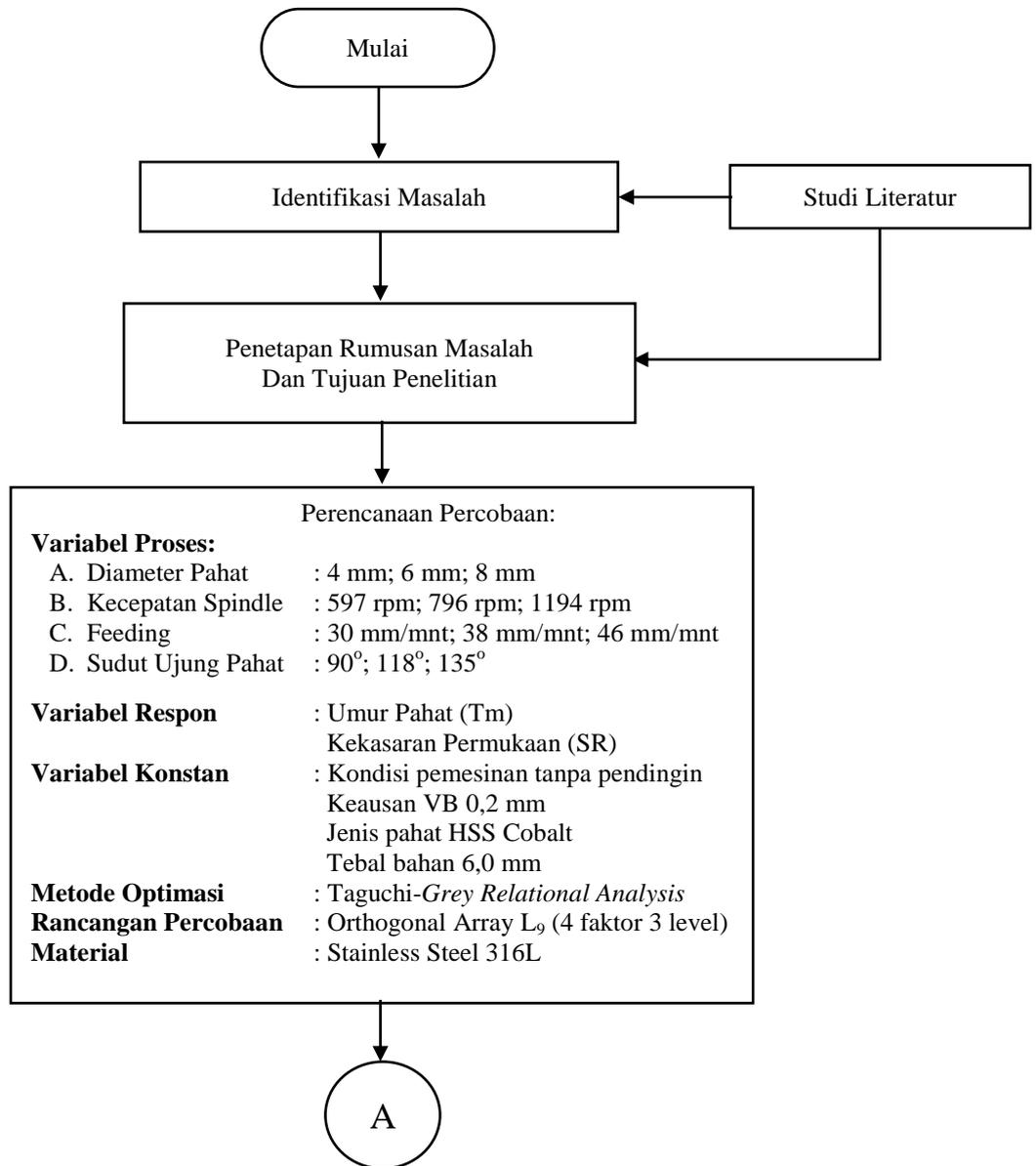
3.5 Pengolahan Data

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

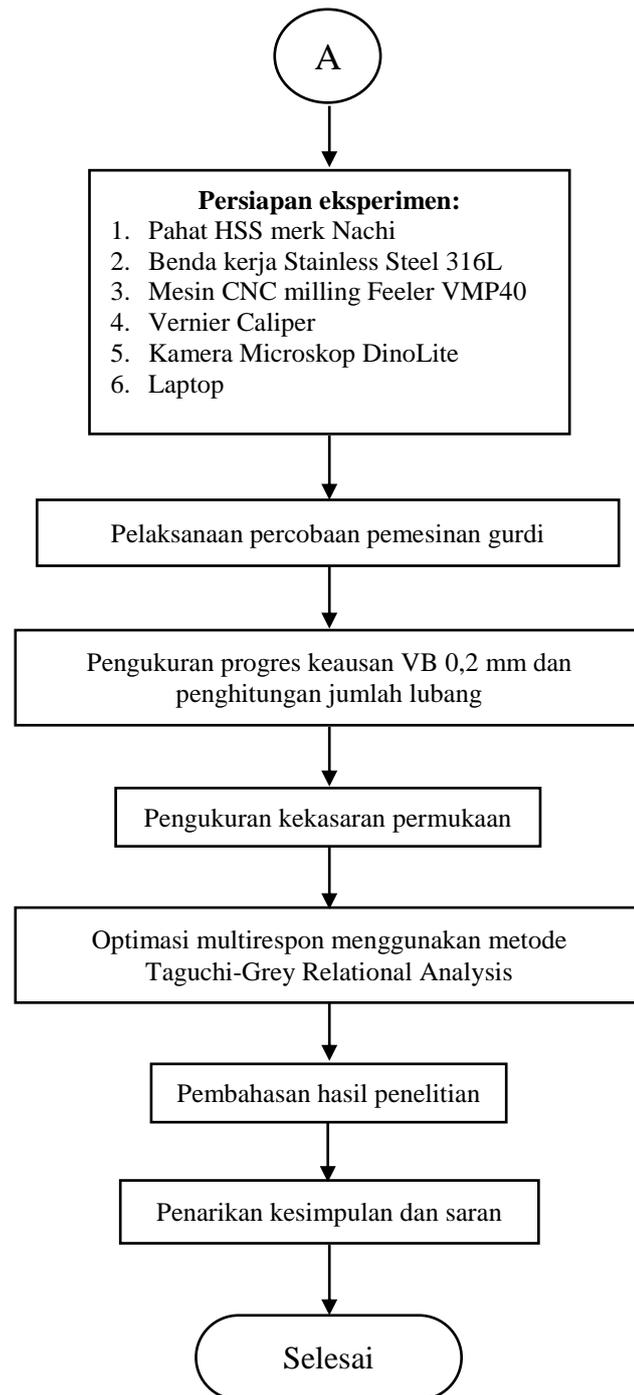
1. Menghitung *Signal Noise Ratio* (SNR)
2. Normalisasi SNR
3. Menghitung nilai delta (*grey relational coefficient* / GRC)
4. Menghitung *grey relational grade* (GRG)
5. ANOVA
6. Uji F
7. Mendapatkan kondisi optimum proses *drilling* untuk jumlah lubang dan kekasaran permukaan
8. Pengujian konfirmasi
9. Membandingkan hasil analisa GRG dengan hasil uji konfirmasi

3.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3. 13 Diagram alir penelitian



Gambar 3. 14 Diagram alir penelitian (lanjutan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pembahasan dalam bab sebelumnya dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan menggunakan Metode Taguchi, hasil penelitian mengungkapkan bahwa seluruh faktor pemesinan yang diobservasi memiliki dampak signifikan terhadap jumlah lubang yang terbentuk, di mana faktor yang memiliki kontribusi paling dominan adalah diameter pahat dengan tingkat partisipasi mencapai 79,88%. Sementara itu, faktor sudut ujung pahat juga membawa pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan benda kerja, dengan tingkat kontribusi mencapai 27,82%.
2. Melalui penerapan Metode GRA (Grey Relational Analysis), ditemukan kombinasi optimal dari faktor percobaan yang paling efektif adalah A1 B2 C2 D3 (diameter pahat 4 mm, kecepatan spindel 796 rpm, feeding 38 mm/menit, dan sudut ujung pahat 135°. Faktor sudut ujung pahat menunjukkan pengaruh yang paling signifikan dengan kontribusi mencapai 59,80% dalam hasil eksperimen. Dalam kondisi optimal tersebut, nilai respon jumlah lubang mencapai 59 lubang, sementara kekasaran permukaan mencapai 0,633 μm , mengindikasikan prestasi terbaik yang dapat dicapai dalam eksperimen ini. Setelah dilakukan uji konfirmasi, hasil *Grey Relational Grade* (GRG) dari faktor optimal **A1 B2 C2 D3** adalah 0,667. Nilai itu meningkat sebesar 28,76% dari nilai GRG awal yaitu 0,518.

5.2 Saran

Saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Dapat dikembangkan lagi pengujian dengan menggunakan spesifikasi pahat dan metode optimasi yang berbeda.
2. Dapat dikembangkan lagi penelitian proses penggurdian untuk material biomedis yang lain seperti titanium dan magnesium.
3. Untuk proses penggurdian disarankan menggunakan *twist drill* dengan diameter ≤ 6 mm menyesuaikan dengan diameter baut implan yang lazim digunakan di dunia medis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abele, E., & Fujara, M. (2010). CIRP Annals - Manufacturing Technology Simulation-based twist drill design and geometry optimization. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 145–150.
- Ahmed, Y. S. (2018). *Prediction and Optimization of Drilling Parameters in Drilling of AISI 304 and AISI 2205 Steels with PVD Monolayer and Multilayer Coated Drills*.
- Ambhore, N., Kamble, D., Chinchankar, S., & Wayal, V. (2015). Tool condition monitoring system: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 3419–3428.
- 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.
- Azwina, R., Wardani, P., Sitanggang, F., & Silalahi, P. R. (2023). Strategi Industri Manufaktur Dalam Meningkatkan Percepatan Pertumbuhan Ekonomi Di Indonesia. *Bisnis Dan Akuntansi*, 2(1), 44–55.
- Burhanuddin, Y., & Harun, S. (2018). *Kajian Awal Pemantauan Keausan Pahat Potong Berdasarkan Pengukuran Sinyal Arus Motor Listrik Pada Proses Pemesinan Bubut*. 9(September).
- Childs, T. (2000). Metal Machining. *Metal Machining*.
- Da Silva, R. B., Vieira, J. M., Cardoso, R. N., Carvalho, H. C., Costa, E. S., Machado, A. R., & De Ávila, R. F. (2011). Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. *Wear*, 271(9–10), 2459–2465. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.046>
- 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.
- Ezugwu, E. O., & Lai, C. J. (1995). *Failure modes and wear mechanisms of M35 high-speed steel drills when machining inconel 901*. 49, 295–312.

- Fearn, T. (2001). Taguchi Methods. *NIR News*, 12(1), 8–9.
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Achyutha, B. T., & Siddeswarappa, B. (2007). *Genetic algorithm-based burr size minimization in drilling of AISI 316L stainless steel*. 7, 225–236.
- 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.
- Gupta, N. (2012). *an Investigation of Tool Condition Monitoring*. 4(08), 3858–3865.
- 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).
- Jadhav, S., Dambhare, S. G., & Phate, M. R. (n.d.). *A Review of Modern Tool Condition Monitoring Techniques for Cutting Tool Wear Prediction*.
- Janardhan, M., & Krishna, A. G. (2012). *O Ptimization of C Utting P Arameters of Ss316 Using*. 1(9), 275–282.
- Jantunen, E. (2002). A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(9), 997–1010.
- Kamdani, K., Hamsah, A. A., Rafai, N. H., Rahim, M. Z., Wong, C. K., & Chong, Y. L. (2018). Study of cutting force and surface roughness on drilling stainless steel 316l under various coolant condition. *Key Engineering Materials*, 791, 116–122.
- 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.
- Kara, F., Aslantaş, K., & Çiçek, A. (2016). Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI 316L using artificial neural network. *Applied Soft Computing Journal*, 38, 64–74.
- Kim, J. H., Moon, D. K., Lee, D. W., Kim, J. S., Kang, M. C., & Kim, K. H. (2002). Tool wear measuring technique on the machine using CCD and exclusive jig. *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131, 668–674.

- Kumar, M. S., & Deivanathan, R. (2021). Materials Today : Proceedings Effect of process parameters on drilling — An overview. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1401–1406.
- Kurgan, N., & Varol, R. (2010). Mechanical properties of P / M 316L stainless steel materials. *Powder Technology*, 201(3), 242–247.
- Mohanraj, T., Shankar, S., Rajasekar, R., Sakthivel, N. R., & Pramanik, A. (2020). Tool condition monitoring techniques in milling process-a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 1032–1042.
- Nakamura, N., & Abe, M. (2011). (12) Patent Application Publication (10) Pub. No .: US 2011 / 0081215 A1. 1(19).
- Nasional, S., Teknologi, I., Mesin, T., & Teknik, F. (2017). Pengaruh Parameter Proses Gurdi terhadap Kekasaran Permukaan. 403–410.
- Niinomi, M. (2019). Metals For Biomedical Devices. In M. Niinomi (Ed.), *Gastronomía ecuatoriana y turismo local*. (Second, Vol. 1, Issue 69). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- Nur, R., Noordin, M. Y., Izman, S., & Kurniawan, D. (2017). Machining parameters effect in dry turning of AISI 316L stainless steel using coated carbide tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 676–683.
- Prajapati, N. K., & PATEL, S. M. (2013). Optimization of Process Parameters for Surface Roughness and Material Removal Rate for SS 316 on CNC Turning Machine. *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology*, 1(2011), 40–47.
- Ramu, I., Srinivas, P., & Vekatesh, K. (2018). Taguchi based grey relational analysis for optimization of machining parameters of CNC turning steel 316. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1).
- Respati, S. M. B. (2010). Bahan Biomaterial Stainless. 6(1), 5–8.
- Roth, J. T., Djurdjanovic, D., Yang, X., Mears, L., & Kurfess, T. (2010). Quality and inspection of machining operations: Tool condition monitoring. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(4), 0410151–04101516.
- Roth, J. T., Djurdjanovic, D., Yang, X., Mears, L., & Kurfess, T. (2010). Quality and inspection of machining operations: Tool condition monitoring. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(4), 0410151–04101516.

- Saini, A., Vanraj, Goyal, D., Pabla, B. S., & Dhama, S. S. (2017). Intelligent tool wear monitoring in machining ti6al4v alloy using support vector machines. *Communication and Computing Systems - Proceedings of the International Conference on Communication and Computing Systems, ICCCS 2016, January 2019*, 499–505.
- Schmid, S. R. (n.d.). *Manufacturing engineering Illinois Institute of Technology*.
- 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.
- Sharidan, M., & Sharif, S. (2014). *Performance Evaluation on Drilling of Austenitic Stainless Steel 316L Using Hss Tool*. 37(2), 18–28.
- Shaw, M. C., & Cookson, J. O. (2005). Metal cutting principles (Vol. 2). In *Dairy Science & Technology*, CRC Taylor & Francis Group (Issue June).
- Sulistiyan, S. R., Burhanudin, Y., & Harun, S. (2012). Characterization of cutting temperature and ignition phenomena of magnesium chip using infrared imaging. *Advanced Materials Research*, 588–589, 1744–1747.
- Sultan, A. Z., Sharif, S., & Kurniawan, D. (2015). Effect of Machining Parameters on Tool Wear and Hole Quality of AISI 316L Stainless Steel in Conventional Drilling. *Procedia Manufacturing*, 2(February), 202–207.
- Sultan, A. Z., Sharif, S., & Kurniawan, D. (2020). Drilling of AISI 316L stainless steel: Effect of coolant condition on surface roughness and tool wear. *AIP Conference Proceedings*, 2217(April).
- Sultan, A. Z., Sharif, S., Nor, F. M., & Kurniawan, D. (2019). Minimum quantity of lubricant drilling of stainless steel using refined palm olein: Effect of coating tool on surface roughness and tool wear. *Procedia Manufacturing*, 30, 427–434.
- Taylor, P., Hasçal, A., Buytoz, Ö., & Meyveci, A. (n.d.). *Materials and Manufacturing Processes Performance Evaluation of Different Twist Drills in Dry Drilling of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Performance Evaluation of Different Twist Drills in Dry Drilling of AISI 304 Austenitic Stainless Steel*. November 2014, 37–41.
- Vasudevan, A., Kolappan, S., & Subramani, K. (2021). Optimization of drilling process parameters of AA7150/MoO₃composites using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 47(4), 251–256.

W. S. Lee, T. H. Chen, C. F. Lin, and W. Z. Luo, “Dynamic mechanical response of biomedical 316L stainless steel as function of strain rate and

Zahoor, S., Saleem, M. Q., Abdul-Kader, W., Ishfaq, K., Shehzad, A., Ghani, H. U., Hussain, A., Usman, M., & Dawood, M. (2019). Improving surface integrity aspects of AISI 316L in the context of bioimplant applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(7–8), 2857–2867.