

**APLIKASI METODE *MAHALANOBIS TAGUCHI SYSTEM* UNTUK
PEMANTAUAN DAN ASESMEN KEAUSAN PAHAT POTONG
PADA PROSES PENGEBORAN SS 316L**

TESIS

Oleh :

**SURAYA
NPM : 2125021011**



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

ABSTRAK

APLIKASI METODE MAHALANOBIS TAGUCHI SYSTEM UNTUK PEMANTAUAN DAN ASESMEN KEAUSAN PAHAT POTONG PADA PROSES PENGEBORAN SS 316L

Oleh

Suraya

Pada proses pemesinan pengerjaan logam alat potong yang digunakan secara terus - menerus pasti akan mengalami keausan karena Hal tersebut tidak dapat dihindari, mengingat pada saat pemotongan berlangsung deformasi geser dan gesekan yang menimbulkan panas dapat mengubah struktur makro dan mikro alat potong. Keausan alat potong ini dapat diamati dari perubahan bentuk alat potong. Keausan yang terjadi pada alat potong tentu akan menimbulkan kerugian pada proses pemesinan , karena hasilnya tidak sesuai dengan yang diharapkan misalnya ukuran yang tidak sesuai, kekasaran permukaan yang besar, getaran mesin yang besar, arus listrik yang berubah dan lain lain. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan parameter permesinan yang sesuai untuk pengeboran SS316L menggunakan Sistem Mahalanobis Taguchi..

Penelitian ini melakukan uji eksperimental pengeboran dilakukan pada benda kerja plat SS 316L menggunakan pahat bor HSS. Pengamatan keausan menggunakan kamera CCD dan juga menggunakan software CAD untuk mengukur progress keausan. Faktor dan parameter yang digunakan dalam eksperimen meliputi kecepatan putar spindle (1194 796 597 rpm),kecepatan pemakanan (46, 38, 30 m/menit), sudut point angle (90°, 118°, 135°), serta diameter pahat bor (4, 6, 8 mm).Penelitian ini menggunakan Mahalanobis Taguchi System untuk analisa data eksperimen.Pengeboran dilakukan sampai pahat bor mengalami keausan. Perhitungan Analisa Anova dilakukan untuk melihat faktor yang signifikan mempengaruhi respon. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa nilai keausan dalam rentang 0.19 – 0.3mm , banyak lubang yang berhasil dibuat antara 6 - 39 lubang, arus listrik antara 0.44A – 5.25A.

Kata Kunci : Parameter pemotongan,pengeboran,pemakanan,keausan alat potong.

ABSTRACT

APPLICATION OF THE MAHALANOBIS TAGUCHI SYSTEM METHOD FOR MONITORING THE WEAR ASSESSMENT OF CUTTING TOOLS IN THE DRILLING PROCESS OF SS 316L

By

Suraya

In machining metal, the cutting tools used continuously will inevitably experience wear. During the cutting process, shear deformation and friction generate heat, which can alter the macro and micro structures of the cutting tools. Tool wear can be observed through changes in the tool's shape. The wear that occurs on the cutting tools will result in losses in the machining process, as the outcomes may deviate from expectations, such as incorrect dimensions, rough surface finishes, excessive machine vibrations, fluctuating electrical currents, and so on. The objective of this research is to determine suitable machining parameters for SS316L drilling using Mahalanobis Taguchi System.

This research conducted experimental drilling on an SS 316L plate using an HSS drill bit. Wear observation was carried out using a CCD camera and CAD software to measure wear progress. The factors and parameters used in the experiment included spindle rotational speed (1194, 796, 597 rpm), feed rate (46, 38, 30 m/minute), point angle (90°, 118°, 135°), and drill bit diameter (4, 6, 8 mm). This study employed the Mahalanobis Taguchi System for experimental data analysis. Drilling was performed until the drill bits occurred wear and tear. Analysis of Variance (ANOVA) calculations were conducted to identify significant factors influencing the response. The results of the research indicated that the wear values ranged from 0.19 to 0.3 mm, with a successful production of 6 to 39 holes and the electrical current ranged from 0.44A to 5.25A.

Keywords: *Cutting parameter, drilling, feeding, tool wear.*

**APLIKASI METODE *MAHALANOBIS TAGUCHI SYSTEM* UNTUK
PEMANTAUAN DAN ASESMEN KEAUSAN PAHAT POTONG
PADA PROSES PENGEBORAN SS 316L**

Oleh :

SURAYA

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister Teknik

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 : **APLIKASI METODE
MAHALANOBIS TAGUCHI SYSTEM
UNTUK PEMANTAUAN DAN
ASESMEN KEAUSAN PAHAT
POTONG PADA PROSES
PENGEBORAN SS 316L**

Nama Mahasiswa : **Suraya**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2125021011

Program Studi : Teknik Mesin

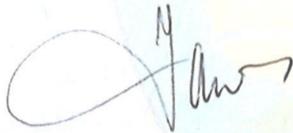
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota



Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin., M.T.
NIP. 19640506 200003 1 001



Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.
NIP. 19700501 200003 1 001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin



Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 19710331 199903 1 003

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 19690620 200003 1001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

Penguji Utama I : **Dr. Ir. Gusri A. Ibrahim, S.T., M.T.**

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

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Mughadi, M.Si.

NIP 19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: **21 Oktober 2023**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuansaya, di dalam Naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal25 ayat 2 dan pasal70).

Bandar Lampung, 16 Oktober 2023

Yang Membuat



Suraya
NPM 2125021011

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Surakarta , Jawa Tengah pada 1 Oktober 1981, sebagai anak kedua dari dua bersaudara, dengan orang tua Bapak Sardiman dan Ibu Sayekti. Jenjang pendidikan pertama yang dijalani penulis adalah Pendidikan Sekolah Dasar Kanisius Tipes 1988 hingga lulus tahun 1994. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 19 Surakarta , akhirnya pada tahun 1997 penulis lulus dari SMP negeri di kota Surakarta. Kemudian pada tahun 1997 penulis kemudian melanjutkan pendidikan di SMK Katolik St. Mikael Surakarta yang merupakan salah satu SMK favorit di Kota Surakarta, akhirnya pada tahun 2000 penulis lulus dari jenjang pendidikan SMK.

Pada tahun 2000, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Akademi Teknik Mesin Industri St. Mikael Surakarta dan lulus pada tahun 2003. Setelah lulus penulis bekerja di PT Indolakto , Sukabumi yang bergerak di bidang minuman susu kental manis selama 7 tahun sebagai Supervisor Produksi. Kemudian penulis tahun 2010 memutuskan untuk pindah kerja di ATMI Cikarang sebagai Instruktur Mesin mesin CNC sampai pada tahun 2012 penulis memutuskan untuk pindah kerja di PT Tekno Indonesia sebagai *Machining Supervisor* hingga pada tahun 2013 memutuskan untuk pindah kerja kembali sebagai Instruktur di Sekolah Vokasi Sugar Group. Pada tahun 2014 diberikan kesempatan untuk menempuh jenjang pendidikan S1 di Universitas Muhammadiyah Metro dengan biaya dari perusahaan, penulis lulus

jenjang S1 pada tahun 2016.

Tahun 2021 penulis diberikan kesempatan kembali untuk meneruskan jenjang pendidikan PascaSarjana (S2) di jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung (UNILA). Selama menempuh pendidikan di UNILA, penulis melakukan penelitian Tesis dengan judul tugas akhir “Aplikasi Metode *Mahalanobis Taguchi System* Untuk Pemantauan Dan Asesmen Keausan Pahat Potong Pada Proses Pengeboran SS 316L” dibawah bimbingan Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin., M.T. dan Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.

Bandar Lampung, 16 Juli 2023

Penulis,

Suraya

Ucapan Terima kasih

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan karena kelimpahan berkatNya Tesis telah selesai dengan baik. Tesis yang berjudul “Aplikasi Metode Mahalanobis Taguchi System Untuk Pemantauan Dan Asesmen Keausan Pahat Potong Pada Proses Pengeboran SS 316l” ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan kurikulum sarjana Strata-2 (S-2) pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. .

Penulisan tesis ini tidak mungkin terwujud tanpa dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak yang luar biasa. Pertama-tama, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Kuasa, yang telah memberikan petunjuk, inspirasi, dan kekuatan dalam perjalanan ini. Semua pencapaian ini adalah karunia-Nya, dan saya bersyukur atas rahmat-Nya.

Ungkapan rasa hormat, cinta, kasih sayang dan terima kasih kepada bapak Sardiman dan ibu Sayekti yang mendidik dan membesarkan dengan penuh cinta kasih sayang kepada Penulis yang selalu memberikan doa yang terbaik untuk keberhasilan Penulis. Ungkapan kasih sayang dan cinta untuk Istri penulis Kristina Suranti yang telah mendampingi, memberikan dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan studi Magister. Kepada anak-anak penulis Jovita Clarinta Andini dan Joshua Aryasatya Erlangga sebagai yang telah hadir di kehidupan selama melaksanakan studi. Serta kakak Sularta serta keluarga besar yang selama ini telah banyak memberikan doa, perhatian, kasih sayang, semangat dan dukungannya kepada Penulis, semoga Tuhan senantiasa memberkati kita semua.

Penyelesaian Tesis ini tentu tidaklah lepas dari bantuan, bimbingan, dukungan serta semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Pascasarjana Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Dr. Eng. Harmen, S.T., M.T., selaku Ketua Program Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang telah bersedia menyempatkan waktunya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
5. Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua, yang telah menyediakan waktu dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
6. Gusri A. Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen penguji I yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.
7. Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met., selaku dosen penguji II yang telah bersedia memberikan saran dan kritik dalam penyempurnaan penulisan tesis ini.

8. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Magister Teknik Mesin yang banyak memberikan ilmu selama penulis melaksanakan studi, baik berupa materi perkuliahan maupun teladan dan motivasi.
9. Teman-teman Pasca Sarjana Teknik Mesin (angkatan 2021), semoga kebersamaan dan persaudaraan kita tidak berakhir hanya di kampus ini.
10. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini belum sempurna masih banyak kekurangan, baik dari segi isi maupun cara penyampaiannya. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata, Penulis berharap semoga laporan tesis ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Bandar Lampung, Oktober 2023

Penulis,

Suraya

Motto

“Bersyukur dalam segala hal.”

“Berbuatlah yang baik, tanpa harus mempunyai alasan yang tepat.”

“Melangkah maju tanpa mendorong, naik ke atas tanpa menjatuhkan.”

KATA PENGANTAR

Dengan kerendahan hati dan rasa syukur yang mendalam kepada Tuhan atas berkat dan penyertaanNya penulis telah menyelesaikan penulisan Tesis dengan baik . Tesis yang berjudul “Aplikasi Metode Mahalanobis Taguchi System Untuk Pemantauan Dan Asesmen Keausan Pahat Potong Pada Proses Pengeboran SS 316L” merupakan hasil dari berbagai upaya keras, refleksi mendalam, dan dedikasi yang mendalam. Sebuah perjalanan intelektual yang panjang dan penuh tantangan, yang saya harapkan akan memberikan wawasan yang berharga bagi para pembaca.

Penulis telah berusaha sebaik mungkin untuk melakukan penelitian ini dengan teliti, penulis menyadari adanya kekurangan dan keterbatasan dalam penulisan ini. Oleh karena itu, penulis dengan tulus mengharapkan masukan yang membangun untuk memperbaiki tulisan ini, agar dapat memberikan manfaat yang lebih besar bagi para pembaca yang memerlukan informasi ini.

Dalam perjalanan penulisan tesis ini, penulis menyadari bahwa walaupun segala upaya telah dikerahkan untuk meningkatkan kualitas penulisan, masih terdapat ruang untuk perbaikan. Oleh karena itu, saran yang konstruktif sangat diharapkan, dan penulis akan sangat bersyukur atas masukan yang dapat memperkaya dan memperbaiki isi tesis ini.

Bandar Lampung, Oktober 2023

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
MENYETUJUI.....	v
MENGETAHUI	v
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	vii
Ucapan Terima kasih.....	x
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xx
DAFTAR SINGKATAN.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Masalah	4
1.3 Hipotesis	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Proses Pengeboran	8
2.2 Geometri Alat Potong	9
2.3 Material Alat Potong.....	10
2.5 Parameter Pemesinan.....	12
2.6 Keausan Alat Potong	13
2.7 Pemantauan Kondisi Keausan Alat Potong	15
2.8 Pemantauan visi (<i>Vision Monitoring</i>).....	17
2.9 Material Stainless Steel 316L	20
2.9 Desain Eksperimen	21

2.9.1	Metode Taguchi	23
2.9.2	Tahap Perencanaan	24
2.9.3	Tahap Pelaksanaan Eksperimen.....	27
2.9.4	Tahap Analisis Jarak Mahalanobis.....	28
2.10	Analisa of Varians (ANOVA)	32
BAB III METODE PENELITIAN		36
3.1	Tahapan Penelitian.....	36
3.2	Variable Penelitian.....	37
3.3	Bahan dan Peralatan Penelitian.....	39
3.2.1	Bahan Eksperimen	39
3.2.2	Peralatan Eksperimen	39
3.2.3	Peralatan ukur	41
3.4	Rancangan Percobaan	42
3.4.1	Pengaturan Variabel Proses pada Mesin CNC Milling	42
3.4.2	Prosedur Pelaksanaan Percobaan.....	42
3.5	Pengukuran dan Pengambilan Data	43
3.5.1	Pengambilan Data Keausan <i>Pahat</i>	43
3.5.2	Pengambilan Data <i>Arus Listrik</i>	44
3.6	Tahap Analisa Data.....	44
BAB IV PEMBAHASAN		46
4.1	Hasil Eksperimen.....	46
4.2	Analisis Taguchi Keausan dan Jumlah Lubang	48
4.2.1	Kalkulasi Rasio S/N Keausan dan Jumlah Lubang	48
4.2.2	Normalisasi Rasio S/N Keausan dan Jumlah Lubang	50
4.3	Analisa Sistem Mahalanobis Taguchi Keausan dan Jumlah Lubang	51
4.3.1	Perhitungan Sistem Mahalanobis Taguchi untuk Keausan dan Jumlah Lubang.....	51
4.3.2	Perhitungan Standarisasi Nilai Keausan dan Jumlah Lubang	52
4.3.3	Perhitungan Korelasi Koefisien Keausan dan Jumlah Lubang.....	53
4.3.4	Perhitungan Matrik Invers Keausan dan Jumlah Lubang	54
4.3.5	Perhitungan Jarak Mahalanobis Keausan dan Jumlah Lubang.....	55
4.4	Analisis Taguchi Keausan dan Arus Listrik	57
4.4.1	Kalkulasi Rasio S/N Keausan dan Arus Listrik.....	57

4.4.2	Normalisasi Rasio S/N Keausan dan Arus Listrik.....	58
4.5	Analisa Sistem Mahalanobis Taguchi Keausan dan Kenaikan Arus Listrik60	
4.5.1	Perhitungan Sistem Mahalanobis Taguchi Keausan dan Kenaikan Arus Listrik	60
4.5.2	Perhitungan Standarisasi Nilai Keausan dan Kenaikan Arus Listrik	61
4.5.3	Perhitungan Korelasi Koefisien Keausan dan Kenaikan Arus Listrik.....	62
4.5.4	Perhitungan Inverse Matrik Keausan dan Kenaikan Arus Listrik .	63
4.5.5	Perhitungan Jarak Mahalanobis Keausan dan Arus Listrik	63
4.6	Analisis Sistem Mahalanobis Taguchi Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang.....	66
4.6.1	Kalkulasi Rasio S/N Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang .	66
4.6.2	Normalisasi Rasio S/N Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	67
4.7	Analisa Sistem Mahalanobis Taguchi Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang.....	68
4.7.1	Perhitungan Sistem Mahalanobis Taguchi Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang.....	69
4.7.2	Perhitungan Standarisasi Nilai Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	70
4.7.3	Perhitungan Korelasi Koefisien Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	71
4.7.4	Perhitungan Inverse Matrik Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	72
4.7.5	Perhitungan Jarak Mahalanobis Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	72
4.8	DISKUSI HASIL PERHITUNGAN MAHALANOBIS TAGUCHI SYSTEM	75
4.9	ANOVA.....	77
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	79
5.1	KESIMPULAN.....	79
5.2	SARAN.....	80
DAFTAR PUSTAKA.....		81
LAMPIRAN		84

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel Komposisi SS316L.....	21
Tabel 3. 1 Tabel Rancangan Percobaan.....	42
Tabel 4. 1 Data hasil eksperimen	46
Tabel 4. 2 Rasio S/N Respon Keausan dan Jumlah Lubang	49
Tabel 4. 3 Tabel Normalisasi Rasio S/N	50
Tabel 4. 4 Tabel Standar Deviasi Keausan dan Jumlah Lubang	52
Tabel 4. 5 Tabel Standarisasi Nilai Keausan dan Jumlah Lubang	53
Tabel 4. 6 Korelasi Koefisien	54
Tabel 4. 7 Invers Matrik	54
Tabel 4. 8 Tabel Matrik Mahalanobis Keausan dan Jumlah Lubang	55
Tabel 4. 9 Jarak Mahalanobis Keausan dan Jumlah Lubang.....	56
Tabel 4. 10Klasifikasi Data Jarak Mahalanobis Keausan dan Jumlah Lubang....	57
Tabel 4. 11 Rasio S/N Respon Keausan dan Kenaikan Arus Listrik	58
Tabel 4. 12 Tabel Normalisasi Rasio S/N Keausan dan Kenaikan Arus Listrik..	59
Tabel 4. 13 Tabel Standar Deviasi Keausan dan Kenaikan Arus Listrik	61
Tabel 4. 14 Tabel Standarisasi Nilai Keausan dan Kenaikan Arus Listrik	62
Tabel 4. 15 Korelasi Koefisien	63
Tabel 4. 16 Invers Matrik	63
Tabel 4. 17 Tabel Matrik Mahalanobis Keausan dan Kenaikan Arus Listrik	64
Tabel 4. 18 Jarak Mahalanobis Keausan dan Kenaikan Arus Listrik.....	64
Tabel 4. 19 Klasifikasi Data Jarak Mahalanobis Keausan dan Kenaikan Arus Listrik	65

Tabel 4. 20 Rasio S/N Respon Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	67
Tabel 4. 21 Tabel Normalisasi Rasio S/N	68
Tabel 4. 22 Tabel Standar Deviasi Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang ..	70
Tabel 4. 23 Tabel Standarisasi Nilai.....	71
Tabel 4. 24 Korelasi Koefisien	72
Tabel 4. 25 Invers Matrik	72
Tabel 4. 26Tabel Matrik Mahalanobis Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	73
Tabel 4. 27 Jarak Mahalanobis Arus Listrik dan Jumlah Lubang	73
Tabel 4. 28 Klasifikasi Data Jarak Mahalanobis Kenaikan Arus Listrik dan Jumlah Lubang	74
Tabel 4. 29 Tabel Kontribusi parameter	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Diagram alir kegiatan penelitian	37
Gambar 3. 2 Gambar Kerja Penelitian.....	39
Gambar 3. 3 Mesin Milling CNC merk Feeler VMP40A	40
Gambar 3. 4 Kamera CCD	41
Gambar 3. 5Tang Ampere	41
Gambar 4. 1 Gambar perkembangan keausan pahat vs jumlah lubang.....	47
Gambar 4. 2 Gambar Ellips Jarak Mahanobis Keausan-Jumlah Lubang	56
Gambar 4. 3 Gambar Ellips Mahanobis Keausan - KenaikanArus Listrik	65
Gambar 4. 4 Gambar Ellips Mahanobis Kenaikan Arus Listrik – Jumlah Lubang.....	74
Gambar 4. 5 Gambar perhitungan Anova.....	77

DAFTAR SINGKATAN

CCD	: Charge Coupled Device
CAD	: Computer Aided Design
TCM	: Toolwear Condition Monitoring
CNC	: Computer numerical control
SS	: Stainless Steel
HSS	: High Speed Steel
MRR	: Material Removal Rate
MTS	: Mahalanobis Taguchi System
MD	: Mahalanobis Distance
CS	: Cutting Speed
RPM	: Rotation Per Minute
S/N	: Signal Noise
TW	: Tool Wear
TD	: Twist Drill

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dunia manufaktur di Indonesia semakin hari semakin berkembang. Hal ini tentu membutuhkan dukungan yang kuat dalam membangun dan mengembangkannya. Proses manufaktur logam sebagian besar dikerjakan dengan proses pemesinan dimana ada material yang diproses pemotongan serta alat potong khusus yang dipergunakan. Penggunaan alat potong yang awet, kuat tentu memberi dampak dalam kecepatan pemesinan sekaligus secara ekonomis juga berdampak baik.

Alat potong yang digunakan dalam pemesinan terus menerus akan mengalami keausan setelah banyak pemotongan dilakukan. Hal tersebut tidak dapat dihindari, mengingat pada saat pemotongan berlangsung deformasi plastis dan gesekan yang menimbulkan panas sehingga dapat mengubah struktur makro dan mikro material alat potong. Keausan alat potong ini dapat diamati dari perubahan bentuk alat potong.

Keausan yang terjadi pada alat potong tentu akan menimbulkan kerugian pada proses pemesinan, karena hasilnya tidak sesuai dengan yang diharapkan misalnya ukuran yang tidak sesuai, kekasaran permukaan yang besar, getaran mesin yang besar, arus listrik yang berubah dan lain lain. Maka dari itu perlu adanya pemantauan kondisi keausan alat potong atau *Toolwear Condition Monitoring (disingkat TCM)* untuk meminimalkan kondisi yang merugikan akibat keausan alat potong. (O'Donnell et al., 2001)

Pemantauan keausan alat potong (TCM) dapat dilakukan dengan 2 cara yakni secara langsung (*direct monitoring*) dan tidak langsung (*indirect monitoring*). Pemantauan tidak langsung seperti pengukuran gaya, getaran dan arus sedangkan pemantauan langsung bisa berupa pengukuran dimensi dan visual. Pemantauan keausan secara langsung dapat dilakukan dengan dua metode utama, yaitu pengukuran dimensi dan visual. Pengukuran dimensi memungkinkan untuk mengidentifikasi perubahan fisik pada alat potong seperti pergeseran ukuran atau bentuk yang dapat menunjukkan tanda-tanda awal keausan.

Kondisi alat potong yang aus akan menyebabkan kerugian proses pemesinan terutama pada mesin-mesin manufaktur berbasis CNC yang digunakan dalam produksi *part* secara massal dan presisi. Pemantauan kondisi alat potong (TCM) yang efektif dapat mencegah downtime mesin dan kerusakan komponen yang diproses pemesinan (Dutta et al., 2013).

Salah satu proses dalam pemesinan yang sering digunakan yakni proses pengeboran (*drilling*) pada material benda kerja, alat potong pengeboran berupa mata bor (*twist drill*). Pemantauan kondisi mata bor dilakukan untuk mendapatkan gambaran kondisi mata bor secara *real time* berdasarkan hasil pengambilan gambar, setelah pemesinan dilakukan maupun parameter lain yang dapat memberikan informasi secara utuh bagaimana proses pemesinan dan hasilnya.

Material yang umum diproses di mesin CNC berupa baja, baik baja perkakas maupun baja paduan. Pada penelitian ini akan menggunakan material

baja paduan yakni Stainless steel 316L (SS316L). Kandungan Cr 16 -18 % yang terdapat pada material SS316L menjadikannya tahan terhadap karat, serta ditambahkan unsur lainnya untuk memperbaiki sifat dari SS316L. Penelitian dilakukan untuk mengetahui hasil pemantauan keausan pahat bor yang dapat memberikan kapan alat potong mulai terjadi keausan yang mempengaruhi hasil pemesinan.

Pada penelitian sebelumnya kecepatan potong dan kekerasan mata pahat merupakan faktor yang signifikan terjadinya keausan pada mata pahat ((Lubis et al., 2021). Penelitian mengenai pengembangan menggunakan visi untuk monitor keausan (Schmitt et al., 2012). Penelitian keausan *cutter milling* menggunakan *optical microscope* mendapatkan hasil *image* yang lebih baik (Kim et al., 2002) mendapatkan kesimpulan bahwa sistem visi mesin yang dikembangkan dapat menjadi solusi yang efektif dan efisien dalam mengotomatisasi proses inspeksi keausan alat potong. Penelitian pahat bor yang di *coating* menghasilkan keausan yang rendah mempunyai kemampuan menghasilkan jumlah lubang yang lebih banyak. (Neves et al., 2006)

Penelitian yang dilakukan oleh Yazid dkk menggunakan *Mahalanobis Taguchi System* dalam aplikasinya digunakan untuk justifikasi model *engine* perlu di proses pemesinan ulang atau dinyatakan sebagai produk rijk (Yazid et al., 2015). Mengembangkan metode berbasis *Mahalanobis Distance* untuk memaksimalkan produktivitas di fasilitas manufaktur semi-konduktor. Metode terdiri dari pemantauan real-time terhadap rasio persediaan barang dalam proses terhadap jumlah “*wafers*” dalam proses yang mereka disebut *flow factor*,

menggunakan nilai MD untuk mengidentifikasi proses dan alat yang di luar spesifikasi, dan mengambil tindakan yang diperlukan (Hayashi et al., 2002).

Penelitian yang dilakukan untuk mengamati atau memantau tingkat keausan alat potong berupa *twist drill* pada proses pengeboran material SS316L. Pemantauan dilakukan menggunakan kamera CCD yang terpasang jig khusus. Hasil pemantauan berupa *image* yang akan diteliti sebagai hasil eksperimen. Penelitian ini untuk mendapatkan nilai – nilai parameter pemesinan, dimana nilai parameter yang nantinya dapat digunakan sebagai parameter acuan pada pengeboran SS316L. Berdasarkan pustaka yang telah ada banyak penelitian pengeboran untuk mengoptimasi namun pada penelitian ini menggunakan Metode *Mahalanobis Taguchi System* yang digunakan untuk mengklasifikasi data serta memberikan acuan dalam proses pengeboran SS316L. Penelitian ini menganalisa hasil eksperimen untuk menentukan jarak data terhadap pusat data Jarak Mahalanobis (*Mahalanobis Distance*) sehingga dapat menyatakan kumpulan data berada dalam ellips Mahalanobis atau berada pada *outlier*.

1.2 Tujuan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka penelitian ini mempunyai tujuan yaitu

Menggunakan metode *Mahalanobis Taguchi System* agar dapat mengklasifikasikan data outlier serta menentukan parameter yang sesuai untuk pemesinan pengeboran material SS316L.

1.3 Hipotesis

Proses pemesinan bor plat SS316L semakin tinggi tingkat keausan pahat bor akan semakin sedikit lubang yang dihasilkan, serta semakin tinggi tingkat keausan akan semakin besar arus saat proses pengeboran. Gesekan dapat menimbulkan panas yang mengubah struktur makro dan mikro material pahat bor. Hal ini dipengaruhi oleh nilai putaran *spindle* dan *pemakanan* yang digunakan sebagai parameter pemesinan. Nilai keausan dan kenaikan arus listrik yang besar akan menyebabkan data berada di luar elips Mahalanobis, sehingga data tersebut akan menjadi outlier dalam Sistem Taguchi Mahalanobis.

1.4 Batasan Masalah

Supaya penelitian dapat mencapai tujuan yang diharapkan maka ditentukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Mahalanobis Taguchi System sebagai sarana menentukan data klasifikasi masuk dalam jarak Mahalanobis atau sebagai outlier.
2. Tidak membahas perubahan struktur mikro yang mungkin terjadi saat proses pemesinan.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan mendapatkan data TCM proses pengeboran dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat membantu dunia industri dalam menentukan waktu penggantian alat potong yang tepat.
2. Menambah database tentang pengaturan variabel proses yang tepat pada proses pengeboran untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi.

3. Menambah database penelitian yang mengangkat masalah tentang TCM pada proses pemesinan yang lain.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian yang akan dilakukan dengan sistematika penulisan seperti berikut ini:

1.6.1 Pendahuluan

Pada bagian ini dijelaskan secara singkat latar belakang dilakukannya penelitian. Setelah latar belakang disampaikan tujuan dan batasan masalah dari penulisan, dan terakhir adalah metode penulisan yang akan dilakukan.

1.6.2 Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang tentang teori dasar yang digunakan untuk dapat melakukan penelitian dan teori yang berkaitan dengan penelitian.

1.6.3 Metodologi

Bagian ini menjabarkan tahapan-tahapan yang dilakukan untuk mendapatkan hasil dari penelitian. Termasuk juga di dalam bagian ini adalah agenda dan rencana waktu penelitian.

1.6.4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini akan menjabarkan hasil penelitian yaitu eksperimen yang dilakukan, dan selanjutnya dijabarkan dalam pembahasan dari hasil eksperimen yang telah diperoleh.

1.6.5 Kesimpulan dan Saran

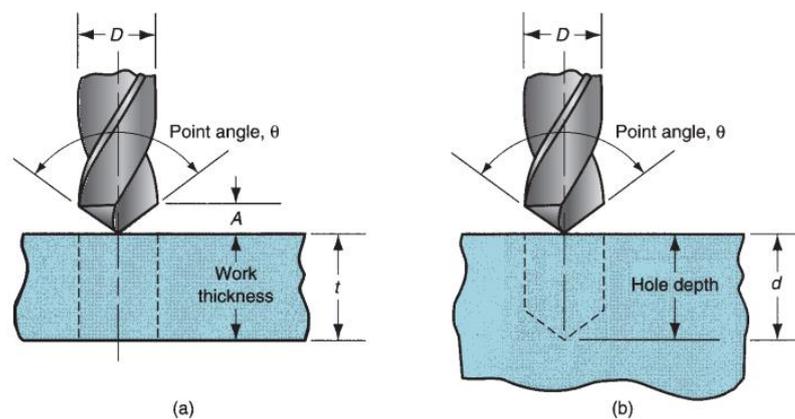
Kesimpulan merupakan hasil penelitian yang ditulis secara ringkas sesuai dengan tujuannya, dan dibandingkan dengan hipotesisnya apakah sesuai atau tidak. Selanjutnya disampaikan saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pengeboran

Proses pembuatan adalah serangkaian langkah untuk mengubah material atau benda kerja menjadi produk jadi dengan mengubah geometri dan sifat bahan baku. Proses manufaktur dapat diklasifikasikan secara luas menjadi pengecoran, pembentukan, pemesinan, perakitan, dan perlakuan panas. Pada penelitian ini lebih fokus pada proses pemesinan terutama proses pengeboran.

Drilling atau pengeboran adalah operasi pemesinan yang digunakan untuk membuat lubang bundar pada benda kerja. Sedangkan *Boring* 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 Jenis pengeboran

Sumber : *Fundamental of Modern Manufacturing* 2010 : Mikell P.Groover

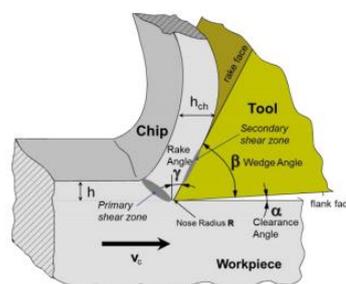
Pengeboran dapat dikategorikan double edge cutting digunakan untuk membuat lubang dengan cara alat potong berputar kemudian ada langkah

pemakanan dijalankan sehingga terjadi proses pemotongan material. Besar dimensi lubang sesuai dengan dimensi *twist drill* yang digunakan.

2.2 Geometri Alat Potong

Alat potong yang digunakan dalam proses pemesinan dapat dibagi menjadi dua kelompok utama: *single cutting point* dan *multiple cutting point*. *single cutting point* hanya memiliki satu sisi potong yang efektif dan biasanya digunakan untuk proses pembubutan. Jika *cutting edge* (sisi potong) tegak lurus terhadap arah pemakanan, maka disebut *orthogonal cutting*. Pemotongan bevel ditentukan saat *cutting edge* miring ke arah pemakanan. *Multiple cutting point* didefinisikan sebagai alat yang memiliki lebih dari satu sisi potong , seperti bor putar, router, dan roda gerinda.

Semua alat potong mempunyai sudut – sudut yang membentuk geometri alat potong. Adapun sudut – sudut tersebut terdiri dari sudut potong (*cutting angle*), sudut garuk (*rake angle*) dan sudut bebas (*clearance angle*) seperti pada gambar 2.2 berikut :



Gambar 2. 2 Sudut alat potong

Sumber : Black, *Materials & Processes in Manufacturing*, 10 ed.(2008)

2.3 Material Alat Potong

Alat potong yang digunakan dalam proses pemesinan harus mempunyai sifat yang lebih baik daripada material yang dipotong. Hal itu disebabkan variasi sifat material yang di proses pemesinan beragam, sehingga alat potong harus mempunyai sifat yang tangguh, tahan panas serta tahan aus. Sifat tersebut akan membuat proses pemesinan menjadi lebih baik dalam laju pengurangan material, waktu lebih efisien dan produktif. Sifat – sifat bahan pahat yang diinginkan yaitu :

1. Tangguh (*Toughness*)

Untuk menghindari kegagalan patah, bahan perkakas harus memiliki ketangguhan yang tinggi. Ketangguhan adalah kapasitas material untuk menyerap energi tanpa gagal. Biasanya dicirikan oleh kombinasi kekuatan dan keuletan pada material.

2. Tahan Panas (*Hot Hardness*)

Kekerasan panas adalah kemampuan suatu material untuk mempertahankan kekerasannya pada tingkat tinggi suhu. Ini diperlukan karena lingkungan bersuhu tinggi dimana alat tersebut beroperasi.

3. Tahan Aus (*Wear Resistance*)

Kekerasan adalah satu-satunya properti terpenting yang dibutuhkan untuk melawan keausan abrasif. Semua material alat pemotong harus keras. Namun, ketahanan aus di pemotongan logam tidak hanya bergantung pada kekerasan pahat, karena keausan pahat lainnya mekanisme. Karakteristik lain yang mempengaruhi ketahanan aus termasuk finishing permukaan alat, sifat kimia alat potong dan bahan kerja, penggunaan cairan pendingin.

2.4. High Speed Steel (HSS)

Pada pergantian abad, ada pekerjaan metalurgi dasar di Amerika Serikat, di antaranya adalah F.W. Taylor dan rekannya, M. White, dan pada tahun 1901, para peneliti ini sangat meningkatkan baja perkakas dan sedikit mengubah komposisinya dengan bahan yang dikenal sebagai baja kecepatan tinggi (HSS). Baja kecepatan tinggi bukanlah bahan baru, tetapi pada dasarnya adalah metode perlakuan panas yang inovatif. Komposisi metalurgi khas HSS dari adalah: 1,9% *Carbon*, 0,3% *Mangan*, 8% *Tungsten* dan 3,8% *Chromium*, dengan sisanya besi. Baja perkakas Taylor dan White berbeda secara signifikan dari Mushet dalam peningkatan Tungsten pada dan penggantian tambahan mangan dengan kromium.

Pada tahun 1904, kandungan karbon telah menurun, memungkinkan lebih mudah dalam penempaan HSS ini. Perkembangan pesat HSS berlanjut selama sepuluh tahun berikutnya ketika kandungan Tungsten ditingkatkan untuk meningkatkan "kekerasan panas" -nya. Dalam tahun tersebut, Dr. J.A. Matthews menemukan bahwa penambahan vanadium meningkatkan ketahanan aus material. Sebelum Sebelum 1910, kandungan Tungsten meningkat menjadi 18%, dengan % *Chromium* dan 1% *Vanadium*, sehingga HSS 18:4:1 yang terkenal muncul, komposisi metalurgi dilanjutkan hanya sedikit perubahan 40 tahun ke depan.

Sekitar tahun 1950, M2 HSS diperkenalkan di Amerika Serikat, di mana sebagian kandungan *Tungsten* diganti dengan kandungan *Molibdenum*. Ini memberikan perkiraan komposisi metalurgi M2 HSS sebagai berikut: 0,8% C, 4% Cr, 2% V, 6% W dan 5% Mo dan sisanya adalah Fe. Dengan demikian, M2 HSS dapat menahan suhu pemesinan sampai 650°C (yaitu bilah bersinar merah redup)

dan sisi potong masih mampu bertahan ketajamannya. Pada tahun 1970, pemrosesan metalurgi serbuk metalurgi dengan pengepresan statis panas (HIP) diperkenalkan untuk menghasilkan HSS, dengan kontrol yang hati-hati terhadap ukuran partikel elementer; setelah itu, produk yang disinter ditempa dan diroll panas. Perlakuan HSS (HIP) ini menghasilkan matriks unsur yang terdistribusi secara merata, untuk mengatasi kemungkinan pemisahan dan menghasilkan struktur tidak homogen yang biasanya ditemukan dalam penempaan HSS. Teknik pemrosesan P/M ini memungkinkan pembuat baja untuk "menyesuaikan" dan menentukan komposisi metalurgi yang tepat dari paduan. Hal ini memungkinkan alat HSS sinter/tempa yang baru dikembangkan untuk mendekati kinerja cemented carbide dibandingkan dengan ketahanan aus, kekerasan bawaan, dan daya tahan.

2.5 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 dari ketiga variabel maka akan mendapatkan proses pemesinan yang baik.

Kecepatan potong ialah kecepatan relatif alat potong dalam melakukan pemotongan dalam jarak tertentu pada satuan menit yang dapat dinyatakan dalam m/menit tanpa mengalami kerusakan. Putaran mesin atau rotasi mesin sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong ini, semakin tinggi nilai kecepatan potong maka rotasi mesin semakin tinggi juga. Kecepatan pemakanan jarak yang ditempuh alat potong ke arah gerakan pemakanan (tegak lurus terhadap vektor

kecepatan potong) melalui benda kerja per putaran spindel (mm/putaran). *Feeding* (V_f), jarak pemotong bergerak melalui bahan per menit (mm/min), sering digunakan saat benda kerja tidak berputar (misalnya proses milling). Kedalaman potong (ap) 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. Meningkatkan nilai pemakanan dan/atau kedalaman potong sebesar 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 sebesar (*Material Removal Rate*, MRR) dan umur pakai alat potong menjadi lebih pendek.

2.6 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 untuk mata pahat karbida atau kegagalan fatal pahat diproduksi. Keausan yang terjadi pada alat potong dapat dikelompokkan dalam beberapa jenis yakni :

a. Crater Wear

Keausan ini disebabkan oleh mekanisme keausan abrasif antara serpihan yang muncul dari area pemotongan dan permukaan rake. *Crater wear* terjadi pada permukaan alat yang bersentuhan langsung dengan chip. Akibatnya, area kontak permukaan penggaruk menjadi aus. Keausan kawah dapat meningkatkan sudut penggaruk, menghasilkan potongan yang lebih kecil, tetapi dengan demikian mengurangi kekuatan ujung potong karena sudut *rake* berkurang.

b. Flank Wear

Flank Wear disebabkan oleh mekanisme gerinda tepi potong utama terhadap permukaan mesin pada permukaan flens. Keausan ini secara langsung mempengaruhi akurasi dimensi dan kualitas permukaan benda kerja. Oleh karena itu, jenis pemantauan keausan ini diperlukan untuk mempersiapkan penggantian pahat, untuk menghindari kerugian produksi, dan menyesuaikan parameter pemotongan untuk mengontrol masa pakai pahat.

c. Notch Wear

Notch Wear adalah kombinasi keausan flens dan keausan kawah. Biasanya pada *main cutting edge* dimana kontak dengan permukaan benda kerja atau kedua rahang dan *flange edge* pada kedalaman pemotongan. Keausan ini terutama mempengaruhi permukaan akhir benda kerja.

d. Thermal Cracking

Thermal Cracking dapat terjadi karena fluktuasi suhu selama pemesinan, saat suhu *cutting edge* berubah dengan cepat dari panas ke dingin atau karena penggunaan cairan pendingin yang tidak merata. Retakan termal dapat membentuk tegak lurus terhadap *cutting edge*. Kelelahan termal alat potong juga

dapat menyebabkan efek termal. Material alat potong tertarik keluar atau pecah saat retakan merambat ke dimensi kritis.

e. Chipping

Chipping pada *cutting edge* umumnya terjadi proses pemesinan yang siklusnya *intermittent*, dimana proses pemotongan terjadi tidak secara terus menerus namun ada jeda saat terjadi pemotongan pada material. Kerusakan disebabkan oleh pemakanan yang berlebihan dan kedalaman pemotongan, tepi yang terbentuk, getaran atau keausan *cutting edge* yang berlebihan.

f. Plastic deformation

Plastic deformation dapat ditemukan pada *cutting edge* saat material alat melunak di zona pemotongan pada suhu yang terlalu tinggi karena suplai cairan pendingin yang tidak mencukupi. Hal ini menyebabkan perubahan geometri alat dan dengan demikian kinerjanya akan menjadi lebih buruk.

2.7 Pemantauan Kondisi Keausan Alat Potong

Proses pemesinan adalah salah satu proses pembuatan terpenting yang biasanya mengubah bentuk material digunakan untuk menghasilkan produk setengah jadi dan produk jadi. Pemesinan yang menggunakan alat potong tentu pada waktu tertentu atau volume material yang terpotong akan terjadi keausan pada sisi potongnya. Keausan yang muncul akan mempengaruhi kualitas produk yang dihasilkan yakni dimensi yang tidak sesuai, nilai kekasaran yang tinggi, kerusakan atau alat potong patah. Akibat selanjutnya akan terjadi mesin berhenti tidak direncanakan karena produk dan alat potong yang rusak.

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.

Faktor yang mempengaruhi produktivitas salah satunya merencanakan waktu henti/*downtime* mesin, pada manufaktur proses penggantian alat potong merupakan waktu henti yang direncanakan. Hal tersebut dapat terjadi jika pemantauan kondisi alat ukur dilakukan untuk melihat keausannya. Akurasi dan produksi mesin akan tetap konsisten dicapai karena kondisi alat potong selalu dalam kondisi yang baik.

Pemantau 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 andal (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 andal dan efisien. Akibatnya, permintaan untuk sistem pemantauan kondisi alat meningkat, karena dalam dunia usaha 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.

2.8 Pemantauan visi (*Vision Monitoring*)

Ada dua metode yang berbeda untuk memantau proses pemesinan. Metode langsung didasarkan pada pengukuran langsung, dan berkaitan dengan pengukuran alat yang sebenarnya memakai dengan menggunakan sensor optik dan laser. Teknik ini digunakan untuk mengukur keausan sisi potong (*flank wear*) dari alat potong atau dengan mengamati keausan permukaan menggunakan metode optik. Metode ini memiliki keunggulan akurasi tinggi dan

reliabilitas, tetapi tidak dapat digunakan untuk pengukuran secara online karena sulit diterapkan dalam lingkungan proses pemesinan

Sebaliknya, metode tidak langsung didasarkan pada teknologi sensor, dan meskipun ini kurang akurat, lebih cocok untuk aplikasi praktis, dan lebih ekonomis. Saat ini, teknologi sensor terus dikembangkan menjadi lebih akurat, tepat, dan mudah untuk mengkalibrasi atau mengkompensasi sinyal penginderaan. Sebagai akibat, metode tidak langsung kuat, murah, mudah digunakan, dan dapat digunakan untuk pemantauan secara online. TCM memanipulasi pengukuran sensor untuk menentukan status pahat dan untuk mendeteksi anomali proses. Ini bisa berupa keausan alat secara bertahap, kerusakan alat, atau suara yang keras atau getaran yang berlebihan.

Ada beberapa keuntungan yang didapatkan dalam melakukan TCM dalam proses pemesinan, yakni :

1. Pemakaian alat akan menjadi optimum karena penggantian alat hanya dilakukan saat mengalami keausan.
2. Menurunkan besarnya *downtime* karena kerusakan akibat alat potong yang sudah aus.
3. Dapat mengurangi biaya maintenance karena kerusakan mesin dapat dihindari akibat gagal dalam pemesinan.
4. Biaya operasional mesin dapat lebih terkontrol.

Salah satu metode pemantauan alat potong secara langsung dapat dilakukan dengan cara *vision monitoring* dimana teknik ini menggunakan sistem visi komputer untuk memantau dan mengontrol proses pemesinan. Dalam proses

pengolahan, vision monitoring digunakan untuk mendeteksi, mengidentifikasi dan menganalisis berbagai parameter penting terkait produk yang sedang diproses.

Salah satu aplikasi utama inspeksi visual dalam proses produksi adalah inspeksi visual. Sistem visi komputer dilengkapi dengan kamera yang dapat merekam gambar atau video dari bagian atau produk yang sedang diproses. Data citra ini kemudian dianalisis oleh perangkat lunak cerdas untuk mendeteksi kesalahan, cacat, atau penyimpangan dari spesifikasi yang telah ditentukan. Pada tingkat yang lebih tinggi, pelacakan penglihatan juga dapat digunakan untuk mengukur dimensi dan geometri produk dengan akurasi tinggi. Sistem visi komputer dapat mengukur ukuran, sudut, jarak atau bentuk benda kerja secara real time dan memastikan bahwa produk yang dihasilkan memenuhi standar yang sudah ditentukan.

Pada penelitian ini menggunakan kamera CCD untuk mendapatkan gambar/*image* pahat yang digunakan dalam pengeboran. Penggunaan CCD kamera dalam penelitian karena kamera ini mempunyai beberapa kelebihan yang dapat mengakomodir pemantauan keausan pahat dalam proses eksperimen. Berikut kelebihan kamera CCD :

1. Kualitas gambar tinggi: Sensor CCD mampu menghasilkan gambar dengan kejernihan dan resolusi tinggi.
2. Sensitivitas cahaya yang baik: CCD memiliki sensitivitas cahaya rendah yang baik, sehingga cocok untuk digunakan dalam kondisi cahaya redup atau astronomi.

3. Jangkauan dinamis lebar: Kamera CCD dapat menangkap detail area yang sangat terang dan gelap dalam satu gambar.
4. *Low Noise*: CCD cenderung menghasilkan gambar dengan *noise* rendah sehingga menghasilkan gambar yang jernih dan tajam.

2.9 Material *Stainless Steel 316L*

Material baja tahan karat 316L atau biasa disebut SS 316L merupakan baja paduan yang mengandung Cr lebih dari 12% dan Fe kurang dari 50%. Stainless steel tidak menimbulkan korosi dalam kondisi yang keras mengandung oksigen tetapi menimbulkan korosi secara lokal dan kadang-kadang berlubang dalam larutan klorida seperti cairan tubuh. Nikel (Ni), Mo, Tembaga (Cu), Ti, niobium (nb), Nitrogen (N), dll. ditambahkan ke stainless steel untuk meningkatkan daya tahan korosi, tahan panas, kekuatan dan machinability. struktur metalurgi, kekuatan dan ketahanan korosi dari stainless steel tergantung pada kita dan konsentrasi Cr dan baja tahan karat yang dikandungnya diklasifikasikan sebagai besi (Fe- Cr), martensitik (sistem Fe-Cr) dan austenitik (sistem Fe-Cr-Ni) menurut fasa kristal mereka. Baja tahan karat austenitik memiliki ketahanan korosi yang sangat baik umum tetapi tidak kuat. Oleh karena itu, baja tahan karat austenitik diperkuat kerja dan perlakuan panas dan dikeraskan dengan penambahan Nitrogen (N). Penambahan Mo meningkatkan ketahanan korosi karena film pasifnya menjadi lebih stabil. Seri *stainless steel* populer dirangkum. Baru baja tahan lama karat yang digunakan dalam prosthesis pinggul buatan dan cangkok tulang digantikan oleh paduan Ti. Namun, *stainless steel* masih digunakan untuk fiksasi internal tulang yang diangkat setelah

penyembuhan dan kawat dada dan kawat jangkar tulang karena sifat torsi dan tariknya sangat bagus *Stent* utama terbuat dari baja tahan karat *austenitic*.

Pada Tabel 2.1 dapat dilihat kandungan atau komposisi unsur yang terdapat pada SS 316L

Tabel 2. 1 Tabel Komposisi SS316L

Material	C	Si	P	S	Mn	Ni	Mo	W	Co	Fe
Stainless	<0.03	<0.045	<0.03	<1.0	<2.0	16.0	12.0	2.0 -		Bal.
Steel 316L						-	-	3.0		
						18.0	15.0			

Sumber : (Matsushita, 2010)

2.9 Desain Eksperimen

Desain eksperimen merupakan suatu percobaan atau serangkaian percobaan pada sebuah proses atau sistem, dengan perubahan yang sengaja dilakukan pada variabel input, sehingga kita dapat mengamati dan mengidentifikasi penyebab perubahan pada output sistem tersebut. Desain eksperimen didefinisikan sebagai suatu rangkaian pengujian dengan cara mengubah-ubah *input* pada variabel proses dengan tujuan untuk mengetahui penyebab perubahan pada variabel respon, sehingga dapat ditentukan pengaturan variabel proses yang tepat untuk menghasilkan variabel respon yang optimal. Desain eksperimen memerlukan tahapan-tahapan penting agar mengarah dan mengena pada hasil yang diinginkan. Berikut adalah langkah-langkah melakukan desain eksperimen (Iriawan dan Astuti, 2006):

1. Mengenal permasalahan.

Tahapan ini diawali dengan melakukan identifikasi permasalahan hingga

didapat suatu hipotesa yang dapat menjawab permasalahan tersebut.

2. Memilih variabel respon.

Variabel respon adalah variabel tidak bebas, yaitu variabel yang dipengaruhi oleh level variabel proses atau kombinasi level dari variabel proses.

3. Menentukan variabel proses dan level.

Tahapan ini memerlukan pengetahuan yang lebih mengenai permasalahan yang akan diteliti agar variabel proses dan level yang ditentukan tidak menyimpang jauh dari hasil yang diinginkan.

4. Memilih metode desain eksperimen.

Metode desain eksperimen harus disesuaikan dengan tujuan penelitian dan permasalahan yang ada. Ada beberapa metode desain eksperimen yang sering digunakan yaitu desain faktorial, Metode Taguchi dan metode permukaan respon atau *Response Surface Methodology* (RSM).

5. Melaksanakan Percobaan.

Selama percobaan dilaksanakan, proses harus diamati dengan cermat agar percobaan berjalan sesuai rencana.

6. Menganalisis Data.

Analisis data merupakan dasar dalam membuat suatu keputusan dan pernyataan yang tepat. Analisis data pada desain eksperimen dilakukan sesuai dengan metode yang digunakan.

7. Membuat Suatu Keputusan.

Setelah analisis data dilakukan, langkah terakhir adalah membuat suatu

keputusan berdasarkan percobaan yang telah dilakukan.

2.9.1 Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1940. Metode ini digunakan untuk mengoptimalkan hasil eksperimen dan berprinsip pada perbaikan mutu dengan memperkecil efek variasi tanpa menghilangkan penyebab variasi tersebut (Dhavamani dan Alwarsamy, 2011). Metode Taguchi juga bertujuan untuk menekan biaya pemesinan dan *resources* seminimal mungkin. Soejanto (2009) menyatakan bahwa metode Taguchi menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor seperti material, perlengkapan manufaktur, operator, dan kondisi-kondisi lainnya. Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat kokoh (*robust*) terhadap faktor gangguan sehingga metode ini disebut juga sebagai perancangan kokoh atau *robust design*.

Keunggulan metode Taguchi dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya adalah (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena memungkinkan untuk melakukan penelitian yang melibatkan banyak variabel proses dan level dari variabel proses.
2. Menghasilkan proses dengan produk yang konsisten dan kokoh terhadap faktor gangguan.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum.

Namun demikian metode Taguchi memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks, sehingga pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-

hati dan sesuai dengan tujuan penelitian. Secara umum, desain eksperimen Taguchi dibagi menjadi dua tahap utama, yaitu:

2.9.2 Tahap Perencanaan

Perencanaan eksperimen merupakan tahap terpenting yang meliputi perumusan masalah, penetapan tujuan eksperimen, penentuan variabel tak bebas (respon kualitas), identifikasi faktor-faktor (variabel bebas), pemisahan faktor control dan faktor gangguan, penentuan jumlah level dan nilai level faktor, perhitungan derajat kebebasan, pemilihan *Orthogonal Array*, dan penempatan kolom untuk faktor dan interaksi ke dalam *Orthogonal Array*.

1. Perumusan Masalah

Langkah pertama adalah merumuskan/mendefinisikan masalah atau fokus yang akan diselidiki dalam eksperimen. Perumusan masalah harus spesifik dan jelas secara teknis serta dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.

2. Tujuan Eksperimen

Tujuan yang melandasi eksperimen harus dapat menjawab apa yang telah dinyatakan pada perumusan masalah, yaitu mencari sebab yang menjadi akibat pada masalah yang kita amati. Pencarian ini dilakukan secara sistematis.

3. Penentuan Variabel Tak Bebas

Variabel tak bebas adalah variabel yang perubahannya tergantung pada variabel-variabel lain. Dalam merencanakan suatu eksperimen harus dipilih dan ditentukan dengan jelas variabel tak bebas mana yang akan diselidiki.

Dalam eksperimen Taguchi, variabel tak bebas adalah karakteristik yang

terdiri dari tiga kategori, yaitu:

a. Karakteristik yang dapat diukur

Semua hasil akhir dapat diukur dengan skala kontinyu. Contoh: temperatur, berat, tekanan, dan lain-lain.

b. Karakteristik atribut

Hasil akhir yang diamati tidak dapat diukur dengan skala kontinyu, tetapi dapat diklasifikasikan secara kelompok. Contoh: retak, buruk, baik, dan sebagainya.

c. Karakteristik dinamis

Merupakan fungsi representasi dari proses yang diamati. Proses yang diamati digambarkan sebagai *signal* dan *output* digambarkan sebagai hasil dari *signal*. Sebagai contoh adalah sistem transmisi otomatis dengan *input* putaran mesin dan *output* adalah perubahan getar.

4. Identifikasi Faktor-Faktor (Variabel Bebas)

Variabel bebas adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada tahap ini akan dipilih faktor-faktor mana saja yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap variabel tak bebas yang bersangkutan. Beberapa metode dan *tools* yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang diteliti adalah *brainstorming*, *flowchart*, diagram sebab akibat, dan sebagainya.

5. Pemisahan Faktor Kontrol dan Faktor Gangguan

Faktor-faktor yang diamati terbagi atas faktor kontrol dan gangguan. Dalam metode Taguchi, kedua faktor tersebut perlu diselidiki dengan jelas

sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat diatur atau dikendalikan, atau faktor yang nilainya ingin kita atur atau kendalikan. Sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak bisa kita atur atau kendalikan walaupun dapat kita atur akan membutuhkan biaya yang besar.

6. Penentuan Jumlah Level dan Nilai Level Faktor

Pemilihan jumlah level penting artinya untuk ketelitian hasil eksperimen dan biaya pelaksanaan eksperimen. Makin banyak level yang diteliti maka hasil eksperimen akan lebih teliti karena data yang diperoleh lebih banyak. Tetapi banyaknya level akan meningkatkan jumlah pengamatan sehingga meningkatkan biaya eksperimen.

7. Perhitungan Derajat Kebebasan

Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menghitung jumlah minimum eksperimen yang harus dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati.

8. Pemilihan *Orthogonal Array*

Pemilihan *Orthogonal Array* tergantung dari nilai faktor dan interaksi yang diharapkan dan nilai level dari tiap-tiap faktor. Penentuan ini akan mempengaruhi total jumlah derajat kebebasan yang berguna untuk menentukan jenis *Orthogonal Array* yang dipilih.

9. Penempatan Kolom untuk Faktor dan Interaksi ke dalam *Orthogonal Array*

Untuk memudahkan di kolom mana saja diletakkan interaksi faktor pada setiap *Orthogonal Array*, Taguchi menentukan grafik linier dan

Tabel Triangula pada untuk masing-masing *Orthogonal Array*.

2.9.3 Tahap Pelaksanaan Eksperimen

Pada tahap pelaksanaan eksperimen, kita perlu menentukan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

a. Jumlah Replikasi

Replikasi adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama dalam suatu percobaan dengan kondisi yang sama untuk memperoleh ketelitian yang lebih tinggi. Replikasi dilakukan untuk tujuan:

- Menambah ketelitian eksperimen
- Mengurangi tingkat kesalahan pada eksperimen
- Memperoleh harga taksiran kesalahan eksperimen sehingga memungkinkan diadakannya uji signifikan hasil eksperimen.

b. Randomisasi

Dalam eksperimen, selain faktor-faktor yang diselidiki pengaruhnya terhadap variabel, juga terdapat faktor-faktor lain yang tidak terkendali atau tidak diinginkan (seperti kelelahan operator, naik atau turun daya mesin, dan lain-lain) yang dapat mempengaruhi hasil eksperimen. Pengaruh faktor-faktor tersebut diperkecil dengan menyebarkan pengaruh tersebut selama eksperimen melalui randomisasi urutan percobaan. Secara umum randomisasi dimaksudkan untuk:

- Meratakan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen.
- Memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan sehingga diharapkan ada kehomogenan pengaruh

dari setiap perlakuan yang sama.

- Mendapatkan hasil pengamatan yang bebas satu sama lainnya.

Jika replikasi dilakukan dengan tujuan untuk memungkinkan dilakukan uji signifikan, maka randomisasi bertujuan untuk menjadikan uji tersebut valid dengan menghilangkan sifat bias.

Pelaksanaan eksperimen Taguchi adalah melakukan pengerjaan berdasarkan setting faktor pada *Orthogonal Array* dengan jumlah eksperimen sesuai jumlah replikasi dan urutan pada randomisasi. Pada proses eksperimen dilakukan pengumpulan data respon sebanyak jumlah baris pada *Orthogonal Array*. Data respon yang telah diperoleh dari eskperimen diubah menjadi *S/N Ratios (signal to noise ratios)*.

2.9.4 Tahap Analisis pJarak Mahalanobis

Mahalanobis Taguchi System (MTS) bertujuan untuk mengembangkan dan mengoptimalkan sistem diagnostik berskala untuk klasifikasi data. Dalam pendekatan ini, data multivariat dibagikan kelompok produk "*healthy*" atau "normal" dan "abnormal". *Mahalanobis Distance (MD)* digunakan untuk pengukuran tingkat anomali barang. Item abnormal terkadang dapat diklasifikasikan berdasarkan tingkat keparahan abnormalitasnya (Woodall et al., 2003). Normal data adalah data dalam keadaan normal atau diinginkan dan data abnormal ada data yang tidak dalam kondisi normal. Di MTS, rasio SN digunakan mengevaluasi keefektifan sistem.

Keunggulan *Mahalanobis Distance* adalah memperhitungkan korelasi antar variabel, diperlukan dalam analisis pola (Cudney et al., 2009). MTS mendapat perhatian besar karena terbukti efektivitasnya dalam diagnosis dan

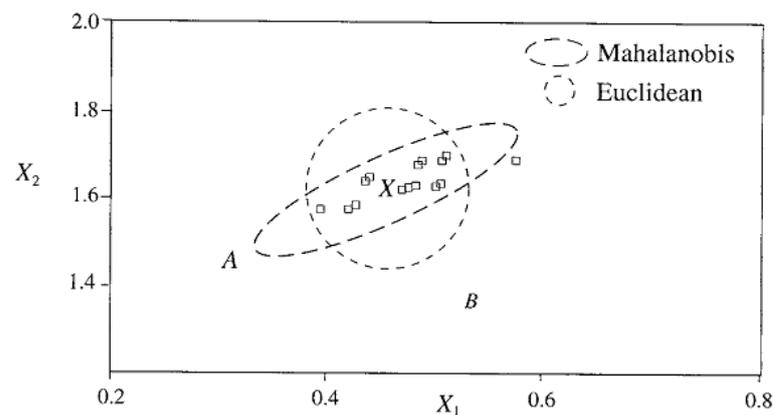
peramalan sistematis menggunakan data dan fitur yang berkorelasi (Reséndiz dan Rull-Flores, 2013; Resendiz et al., 2013). Tidak seperti metode statistik lainnya, MTS adalah analisis data metode dan tidak memerlukan asumsi tentang distribusi variabel input (Taguchi et al., 2005). Perbedaan lain antara MTS dan metode serupa lainnya adalah metodenya klasifikasi di MTS. Kelas lain memiliki dua kelas khusus, normal dan abnormal metode klasifikasi. Namun di MTS, normal adalah satu-satunya kelas dan objek yang tidak normal bukan populasi yang terpisah; sebaliknya, mereka unik karena penampilannya setiap gangguan adalah unik. Oleh karena itu, tujuan MTS bukan untuk mengklasifikasikan data menjadi dua kelompok terpisah (Taguchi dan Rajesh, 2000). Taguchi menggunakan MTS untuk diagnosis dan prognosis. Kegunaan utamanya metode meliputi diagnosis multivariat, pengenalan pola, akurasi prediksi kejadian tertentu dan menentukan derajat penyimpangannya. Salah satu tugas terpenting dari teknik pengambilan data adalah klasifikasi dan pengambilan data informasi

Pada penelitian ini hasil eksperimen akan dianalisa dengan menggunakan metode Jarak Mahalanobis (*Mahalanobis Distance /MD*) sebagai salah satu cara mengolah data dalam statika karena memiliki data yang multi varian. *Mahalanobis Distance* mengukur jarak secara multidimensi ruang dengan memperhitungkan korelasi. MD sangat sensitive struktur korelasi dari kelompok referensi. Dalam metode klasik, MD digunakan untuk mengidentifikasi sejauh mana suatu titik yang tidak diketahui berada dari titik rata-rata kelompok. Pengamatan diklasifikasikan ke dalam kelompok yang dari pusatnya jaraknya paling kecil. Ada busur teknik pengukuran multivarian lainnya, seperti Jarak

Euclidean (ED). Jarak Euclidean juga memberikan jarak dari titik "tidak diketahui" dari titik rata-rata grup, namun dua kerugian dari teknik ini:

(1) jarak Euclidean tidak memberikan pengukuran statistik tentang seberapa baik kecocokan yang tidak diketahui himpunan referensi, dan

(2) hanya mengukur jarak relatif dari titik rata-rata dalam kelompok dan tidak memperhitungkan pembagian poin dalam kelompok.



Gambar 2. 3 Perbandingan Jarak Mahalanobis dan Jarak Euclidean

Sumber: The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Technology System(2002)

Gambar 2.3 menunjukkan perbandingan antara MD dan ED. Diasumsikan bahwa ada referensi yang terdiri dari pengamatan pada variabel X_1 dan X_2 . Dalam gambar ini, bentuk elips mengacu jarak Mahalanobis dan bentuk lingkaran mengacu pada jarak Euclidean dari titik referensi. Jika diasumsikan bahwa dua titik sampel A dan B yang tidak diketahui telah ditambahkan ke sistem, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.

Dengan metode jarak Euclidean, sampel B kemungkinan diklasifikasikan sebagai milik kelompok yang mengandung sampel A karena jarak relatif dari

pusat lingkaran batas titik-titik ini sama. Namun, sampel A jelas terletak sepanjang sumbu memanjang dari titik grup referensi, menunjukkan bahwa sampel A berperilaku lebih seperti kelompok referensi dan tidak mirip dengan sampel B.

Ini akan menjadi jelas jika kita menghitung MD bukannya ED, karena metode ED tidak memperhitungkan korelasi antar variabel (distribusi poin). Oleh karena itu, ED kurang membantu dibandingkan MD dalam analisis multivarian. Dalam metode MTS/MTGS, jarak Mahalanobis dimodifikasi dengan penskalaan yang sesuai. Ini digunakan untuk menentukan basis atau titik referensi skala dan untuk mengukur jarak pengamatan yang tidak diketahui dari titik referensi.

Jarak Mahalanobis didefinisikan sebagai jarak statistik antara dua titik kovarians atau korelasi antara variabel. Jarak Mahalanobis antara dua pengamatandinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$MD_{ik} = (x_i - x_k)'S^{-1}(x_i - x_k)$$

Dimana : $(x_i - x_k)$ adalah vektor dari $p \times 1$

$(x_i - x_k)'$ adalah transpose vektor

S adalah kovarian matriks dari $p \times p$

S^{-1} adalah invers matriks

Jarak Mahalanobis bukan satu-satunya ukuran yang bisa digunakan untuk mengukur jarak antara dua titik, cara lain juga bisa digunakan untuk mengukur tergantung pada objek yang dipelajari. pengukuran jarak harus didasarkan pada konsep matriks. Konsep matriks menggambarkan observasi atau pengamatan sebagai titik dalam ruang berdimensi- p .

2.10 Analisa of Varians (ANOVA)

suatu prosedur di mana variasi total dalam variabel dependen dibagi menjadi komponen yang memiliki makna dan kemudian diamati serta diperlakukan secara sistematis. Misalkan kita memiliki n titik data eksperimental dalam bentuk biasa (x_i, y_i) dan garis regresi diestimasi. Dalam estimasi a^2 dirumuskan sebagai berikut :

$$S_{yy} = bS_{xy} + SSE.$$

Suatu formulasi alternatif dan mungkin lebih informatif adalah:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - fc)^2$$

Kemudian membagi total sumbu kuadrat yang telah disesuaikan untuk variabel y menjadi dua komponen yang seharusnya memiliki signifikansi penting dalam konteks penelitian ini. Dirumuskan menjadi berikut :

$$SST = SSR + SSE.$$

Komponen pertama di sebelah kanan, SSR, disebut jumlah kuadrat regresi dan mencerminkan jumlah variasi dalam nilai-nilai y yang dijelaskan oleh model, dalam hal ini garis lurus yang dihipotesiskan. Komponen kedua adalah jumlah kuadrat *error*, yang mencerminkan variasi seputar garis regresi.

Misalkan kita tertarik untuk menguji hipotesis:

$$H_0: \beta = 0,$$

$$H_1: \beta \neq 0.$$

Di mana hipotesis nol pada dasarnya mengatakan bahwa modelnya adalah $y = a$. Artinya, variasi dalam y disebabkan oleh peluang atau fluktuasi acak yang independen dari nilai-nilai x . Kondisi ini di bawah kondisi hipotesis nol ini, dapat ditunjukkan bahwa SSR/σ^2 dan SSE/σ^2 adalah nilai-nilai dari variabel chi-kuadrat independen dengan derajat kebebasan 1 dan $n-2$, secara berturut-turut, dan kemudian berdasarkan Teorema SST/σ^2 juga merupakan nilai dari variabel chi-kuadrat dengan derajat kebebasan $n-1$. Untuk menguji hipotesis di atas, kita menghitung:

$$f = \frac{SSR/1}{SSE/(n-2)} = \frac{SSR}{s^2}$$

dan menolak H_0 pada tingkat signifikansi α ketika $F > F_{\alpha}(1, n - 2)$.

Perhitungan biasanya disajikan dalam bentuk tabel analisis varians, seperti yang terlihat dalam Tabel 2.2. Adalah umum merujuk kepada berbagai jumlah kuadrat yang dibagi dengan derajat kebebasannya masing-masing sebagai kuadrat rata-rata.

Tabel 2. 2 Analisis Varians untuk Pengujian $\theta = \theta_0$

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	Computed
Regression	SSR	1	$557?$	$\frac{SSR}{s^2}$
Error	SSE	$n - 2$	$\sigma^2 = \frac{SSE}{n-2}$	
Total	SST	$n - 1$		

Ketika hipotesis nol ditolak, yaitu ketika statistik F yang dihitung melebihi nilai kritis $F_{\alpha}(1, n - 2)$, kita menyimpulkan bahwa ada variasi yang signifikan dalam respons yang dijelaskan oleh model yang diajukan, yaitu fungsi garis lurus. Jika

statistik F berada dalam wilayah gagal tolak, kita menyimpulkan bahwa data tidak mencerminkan cukup bukti untuk mendukung model yang diajukan.

Di Bagian 11.5, disajikan suatu prosedur di mana statistik:

$$T = \frac{B - \beta_0}{S/\sqrt{Sxx}}$$

$$t = b/\sigma_0$$

digunakan untuk menguji hipotesis:

$$H_0: \theta = \theta_0,$$

$$H_1: \theta \neq \theta_0,$$

di mana T mengikuti distribusi f dengan derajat kebebasan $n - 2$. Hipotesis ini ditolak jika $|t| > t_{\alpha/2}$, untuk tingkat signifikansi α . Menarik untuk dicatat bahwa dalam kasus khusus di mana kita menguji:

$$H_0: \theta = 0,$$

$$H_1: \theta \neq 0,$$

nilai statistik T kita menjadi:

$$t = \frac{b}{s/\sqrt{Sxx}}$$

dan hipotesis yang sedang dipertimbangkan identik dengan yang diuji dalam Tabel 11.2. Artinya, hipotesis nol menyatakan bahwa variasi dalam respons hanya disebabkan oleh kebetulan. Analisis varians menggunakan distribusi F

daripada distribusi t . Untuk alternatif dua sisi, kedua pendekatan tersebut identik.

Ini dapat kita lihat dengan menuliskan:

$$t_1^2 = \frac{b^2 S_{xx}}{s^2} - \frac{b S_{xy}}{s^2} - \frac{SSR}{s^2}$$

yang identik dengan nilai t yang digunakan dalam analisis varians. Hubungan dasar antara distribusi t dengan derajat kebebasan v dan distribusi F dengan derajat kebebasan 1 dan v adalah:

$$t^2 = f(1, v).$$

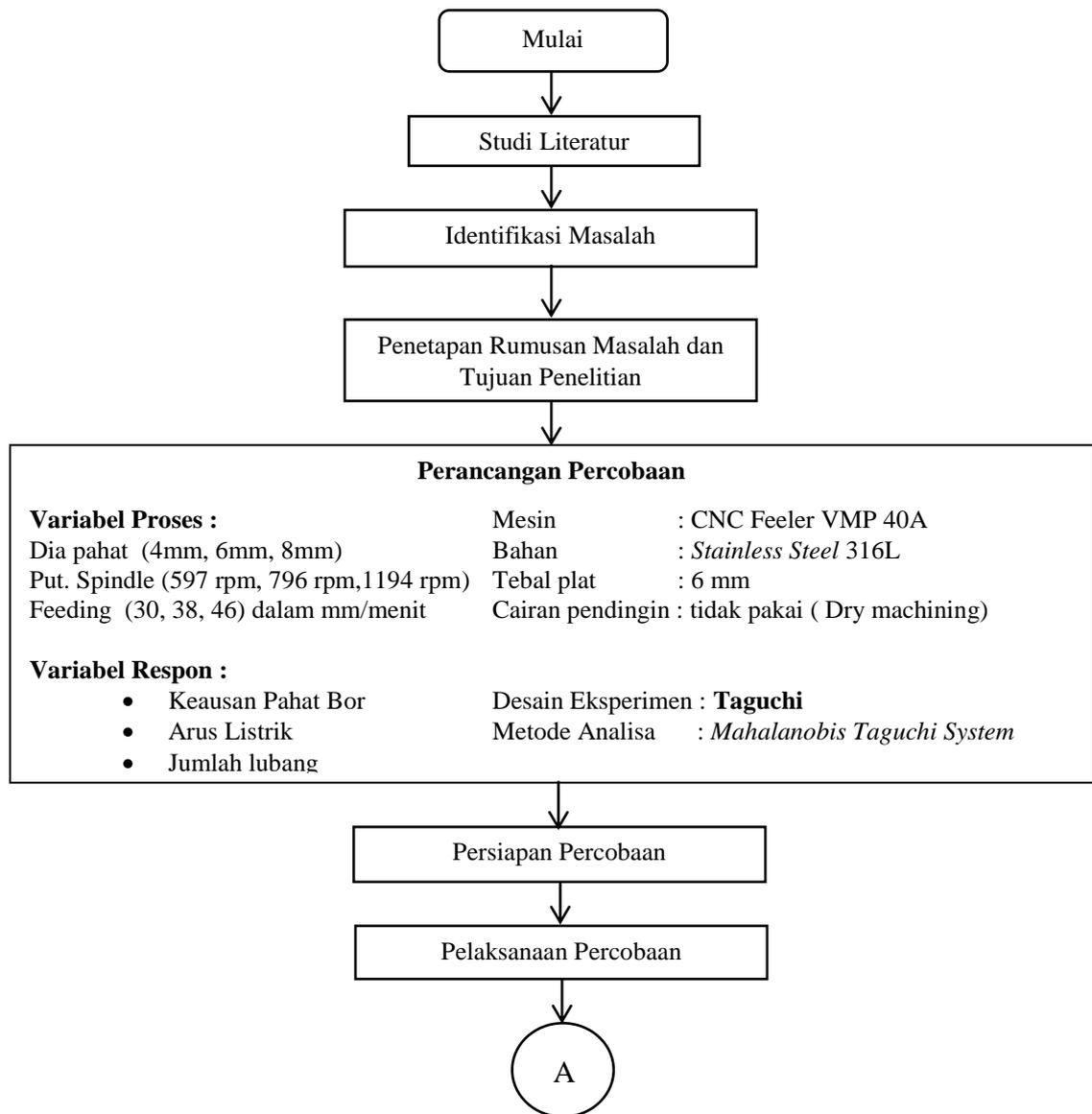
Tentu saja, uji t memungkinkan untuk pengujian terhadap alternatif satu sisi sedangkan uji F dibatasi untuk pengujian terhadap alternatif dua sisi.

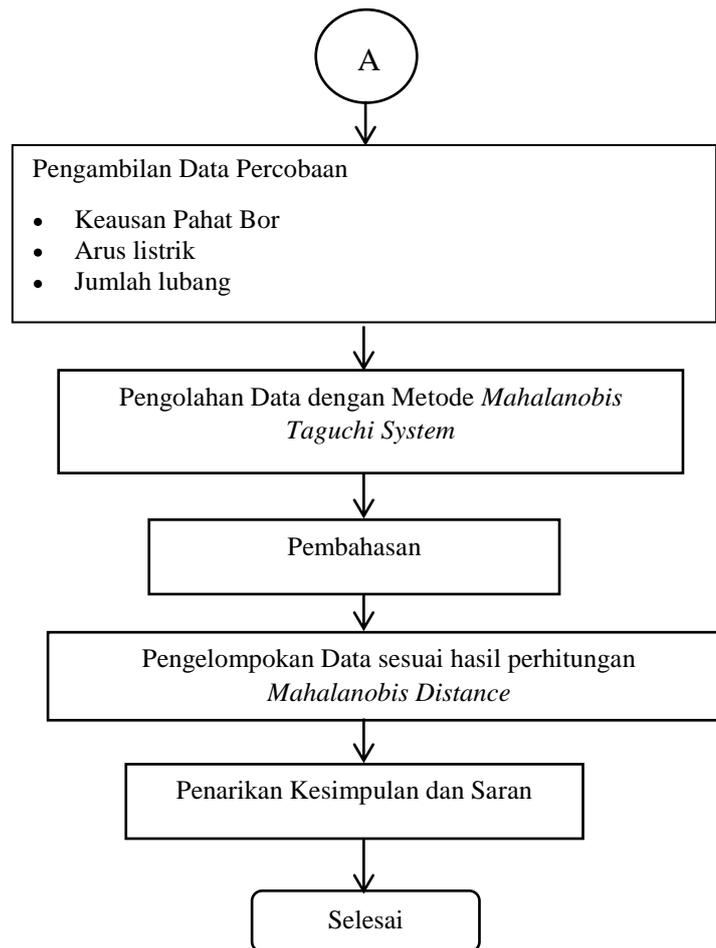
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Menetapkan tahapan penelitian agar penelitian yang dilakukan dapat terarah dan mengena pada tujuan penelitian. Gambar 3.1 berikut ini menunjukkan diagram alir dari penelitian yang dilakukan:





Gambar 3.1 Diagram alir kegiatan penelitian

3.2 Variable Penelitian

Variabel – variabel yang digunakan untuk mendapatkan data eksperimen proses pengeboran pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Variabel 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, 8 mm.

b. Putaran *Spindle* (n)

Besar putaran *spindle* dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut :

$$\text{Jumlah putaran } (n) = \frac{CS \left(\frac{m}{\text{menit}} \right)}{\pi \cdot d \text{ (mm)}} = \frac{1000 \cdot CS \left(\frac{mm}{\text{menit}} \right)}{\pi \cdot d \text{ (mm)}}$$

Parameter CS (*Cutting Speed*) digunakan nilai tengah 10 – 20 m/menit

[Groover, 2012], sehingga besar CS yang digunakan yakni 15m/menit.

Sebagai dasar perhitungan putaran *spindle*.

c. Pemakanan

Pemakanan di mesin cnc milling dapat diatur sesuai dengan paramater yang akan digunakan, berdasarkan penelitian sebelumnya (Lubis et al., 2021) maka besarnya pemakanan 30mm/menit, 38mm/menit dan 46mm/menit.

2. Variabel Konstan

Variabel konstan adalah variabel proses yang tidak diteliti. Tetapi variabel ini dijaga tetap sama selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil eksperimen. Selama proses penelitian menggunakan metode *dry machining*.

3. Variabel Respon

Variabel respon merupakan variabel yang nilainya tidak dapat ditentukan dan nilainya dipengaruhi oleh perlakuan selama eksperimen. Hasil dari variabel respon baru diketahui setelah eksperimen selesai. Berikut variabel respon yang digunakan pada penelitian ini :

- a. Keausan Alat potong (*Toolwear rate*) dalam mm
- b. Arus listrik
- c. Jumlah lubang

3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian

Material dan peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Bahan Eksperimen

- Benda Kerja

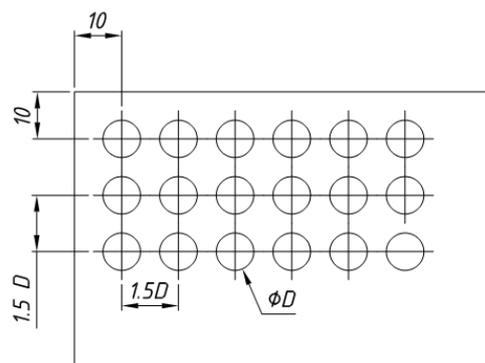
Material yang digunakan untuk benda kerja adalah *stainless steel* 316L dengan dimensi panjang 600 mm, lebar 300 mm, tebal 6 mm. Material ini sedianya digunakan untuk komponen biomedis seperti komponen implan baut tulang, pelat pengapit patah tulang, pin atau screw tulang, kerangka gigi dan gigi palsu.

- Pahat Potong

Pahat Potong yang digunakan dalam penelitian berbahan material HSS merk Nachi dan mempunyai 3 variasi ukuran diameter. Untuk mendapatkan perbandingan terhadap kualitas lubang akhir.

- Gambar kerja

Gambar yang digunakan dalam penelitian, sebagai panduan dalam melakukan pengambilan data saat pelaksanaan proses pengeboran.



Gambar 3. 2 Gambar Kerja Penelitian

3.2.2 Peralatan Eksperimen

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Mesin CNC Milling Feeler VMP 40

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

- a. Merk : Feeler
- b. Model : VMP 40A
- a. Panjang gerakan : sumbu X 1000mm, sumbu Y 500 mm dan sumbu Z 600mm
- c. Coolant : *Dry Machining*
- d. Daya Maksimum : 15 HP



Gambar 3.3 Mesin Milling CNC merk Feeler VMP40A

3.2.3 Peralatan ukur

Beberapa peralatan ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Kamera CCD

Kamera 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 CCD

b. *Software AutoCAD*

Software digunakan untuk mengolah image yang didapatkan oleh kamera CCD dan diukur tingkat keausan alat potong yang sudah ditentukan kriteria aus nya yakni maksimal 0.2 mm

c. *Tang Ampere*

Tang ampere digunakan untuk mengukur besarnya arus yang terjadi saat putaran tanpa beban dan saat terjadi beban pemotongan karena proses pengeboran yang dilakukan.



Gambar 3.5 Tang Ampere

3.4 Rancangan Percobaan

3.4.1 Pengaturan Variabel Proses pada Mesin CNC Milling

Langkah pertama adalah menentukan jenis proses pengeboran yang digunakan dalam penelitian. Berikutnya menentukan parameter yang akan dipakai dalam proses pengeboran pada plat St.St316L, maka penentuan jumlah level dan pengaturan parameter disesuaikan dengan kategori yang telah ditentukan. Rancangan percobaan jika menggunakan metode Taguchi untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Tabel Rancangan Percobaan

No	Diameter Pahat	Putaran <i>Spindle</i>	Pemakanan	Sudut	Jumlah Lubang	Kenaikan Arus	Keausan
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			

3.4.2 Prosedur Pelaksanaan Percobaan

Langkah-langkah pelaksanaan percobaan adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan benda kerja dan *Pahat* . Persiapan benda kerja dan dilakukan untuk memastikan *Pahat* dalam kondisi yang siap pakai.

- b. Memasang benda kerja. Benda kerja dan meja mesin dibersihkan dari minyak dan selanjutnya benda kerja dijepit dengan menggunakan *clamping set*. Selanjutnya di seting titik nol benda kerja di mesin CNC Milling.
- c. Pemasangan alat potong Pahat dan dilakukan seting titik Z nol terhadap benda kerja.
- d. Penentuan henti Pahat di atas kamera CCD untuk mendapatkan image yang baik dan jelas.
- e. Memasukkan program pengeboran dari computer ke mesin CNC Milling
- f. Menjalankan *test run* mesin untuk memastikan program sesuai dengan yang direncanakan.
- g. Menjalankan program pengeboran mesin cnc dan melakukan pengukuran terhadap *image* serta arus listrik yang terjadi 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

Keausan yang terjadi pada proses pengeboran dilakukan dengan menggunakan kamera CCD yang dipergunakan untuk mengambil image pada penampang Pahat . Setiap proses pengeboran selesai membuat 3 lubang maka Pahat akan berhenti di atas kamera.

Selanjutnya diambil image dengan kamera kemudian diolah menggunakan software AutoCAD untuk mengukur nilai keausan yang terjadi. Jika belum mencapai nilai keausan 0.2 mm maka proses pengeboran dilanjutkan kembali

3.5.2 Pengambilan Data Arus Listrik

Arus listrik yang terjadi karena proses pengeboran tentu mengalami peningkatan dibandingkan dengan putaran tanpa beban. Maka perlu untuk melakukan pengukuran dengan cara sebagai berikut :

- a. Siapkan Tang Ampere yang digunakan untuk mengukur, kemudian instal driver PC Link. Kemudian pasang tang ampere pada kabel yang diukur dan dihubungkan dengan PC/ laptop.
- b. Saat mesin dijalankan maka akan terbaca nilai ampere yang sedang berlangsung secara *real time*.
- c. Rekam pembacaan tang ampere selama proses pengeboran berlangsung , jika sudah selesai dilanjutkan untuk *Export* data ke dalam excel.

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 suatu tampilan tertentu yang 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 *Taguchi Mahalanobis System*. Dimana nantinya data statistik dapat diukur jarak mahalanobis terhadap titik pusat elip Mahalanobis, sehingga data dapat terlihat berada di dalam area elip atau di luar elip serta besarnya jarak Mahalanobis pada data tersebut.

Pada metode Mahalanobis Taguchi System ada beberapa langkah yang dapat digunakan untuk mendapatkan Jarak Mahalanobis sebagai berikut :

1. Menentukan standar deviasi pada data
2. Membuat Standarisasi nilai
3. Menghitung Koefisien Korelasi
4. Menghitung invers Matrik
5. Menghitung Jarak Mahalanobis
6. Analisa Signifikansi
7. Kesimpulan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian eksperimen pengeboran pada plat SS 316L dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan analisa *Mahalanobis Taguchi System* maka dapat diambil kesimpulan bahwa MTS mampu digunakan untuk menganalisa dan menentukan variasi parameter yang sesuai untuk pemesinan pengeboran pada material SS316L. Variasi parameter yang direkomendasikan agar mendapatkan nilai keausan yang kecil , jumlah lubang yang banyak dan peningkatan arus listrik yang kecil untuk proses pengeboran yaitu diameter pahat 4 mm dan 6 mm , putaran spindle 579 rpm, 796 rpm dan 1194 rpm, pemakanan 30mm/menit, 38mm/menit, 46mm/menit , sudut 90°, 118°, dan 135°.
2. Berdasarkan analisa *Mahalanobis Taguchi System* maka dapat diambil kesimpulan bahwa pahat bor diameter 8 dengan variasi parameternya muncul sebagai data outlier karena jumlah lubang yang sedikit yang secara konsisten berada diluar elip Mahalanobis yang dapat disimpulkan bahwa variasi parameter pemesinan yang digunakan tidak mendapatkan hasil yang baik sehingga tidak direkomendasikan untuk pemesinan pengeboran.

5.2 SARAN

Berdasarkan eksperimen dan analisa yang sudah dilakukan maka penelitian dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya perlu disampaikan saran – saran sebagai berikut :

1. Perlu dianalisa lebih lanjut mengenai optimasi parameter pengeboran pada material SS 316L.
2. Perlu dianalisa lebih lanjut perubahan struktur mikro pada pahat bor untuk proses pemesinan material SS 316L.
3. Perlu dianalisa dan diteliti lebih lanjut hubungan antara keausan dan silindrisitas lubang hasil pengeboran material SS 316L.

DAFTAR PUSTAKA

- Cudney, E.A., Drain, D., Paryani, K. and Sharma, N. (2009), "A comparison of the Mahalanobis-Taguchi system to a standard statistical method for defect detection", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 2 No. 4, pp. 250-258.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.005>
- Hayashi, S., Tanaka, Y., & Kodama, E. (2002). Mahalanobis Distance for Maximizing Productivity. *Matrix*, 15(4), 442–446.
- 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)
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00733-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00733-1)
- Lubis, S. Y., Putri Askolani, A., Ariyanti, S., Teknologi Industri, J., & Teknik Mesin, P. (2021). *Analisa 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>
- Neves, D., Diniz, A. E., & de Lima, M. S. F. (2006). Efficiency of the laser texturing on the adhesion of the coated twist drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1–3), 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.068>
- O'Donnell, G., Young, P., Kelly, K., & Byrne, G. (2001). Towards the improvement of tool condition monitoring systems in the manufacturing environment. *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1–3), 133–139. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00928-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00928-1)
- 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>

- Yazid, A. M., Rijal, J. K., Awaluddin, M. S., & Sari, E. (2015). Pattern recognition on remanufacturing automotive component as support decision making using Mahalanobis-Taguchi system. *Procedia CIRP*, 26, 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.025>
- Soejanto, I. (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Sultan, A. Z., Safian Sharif, and Denni Kurniawan, ‘Chip Formation When Drilling AISI 316L Stainless Steel Using Carbide Twist Drill’, *Procedia Manufacturing*, 2, February (2015), 224–29
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.039>
- Taguchi, G. and Rajesh, J. (2000), “New trends in multi variate diagnosis”, *The Indian Journal of Statistics*, Vol. 62 No. 2, pp. 233-248.
- Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y. (2005), *Taguchi’s Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, New York, NY.“
- Taguchi G, Jugulum R (2002). *The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Technology System*, John Wiley & Sons
- Wan Zahari Wan Yusoff and Maziah Ismail, ‘기사 (Article) 와 안내문 (Information) [’, *The Eletronic Library*, 34.1 (2008), 1–5
- Woodall, W.H., Koudelik, R., Tsui, K.L., Kim, S.B., Stoumbos, Z.G. and Carvounis, C.P. (2003), “A review and analysis of the Mahalanobis-Taguchi system”, *Technometrics*, Vol. 45 No. 1, pp. 1-15.
- Wong, Y. S., A. Y.C. Nee, X. Q. Li, and C. Reisdorf, ‘Tool Condition Monitoring Using Laser Scatter Pattern’, *Journal of Materials Processing Technology*, 63.1–3 (1997), 205–10 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02625-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02625-8)
- Yazid, A. M., Rijal, J. K., Awaluddin, M. S., & Sari, E. (2015). Pattern recognition on remanufacturing automotive component as support decision making using Mahalanobis-Taguchi system. *Procedia CIRP*, 26, 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.025>
- Y. Burhanuddin, C.H. Che Haron, J.A. Ghani, A. K. Ariffin, G.A. Ibrahim, A. Yasir and N.H. El-Maghribi, ‘The Effects of CBN Cutting Tool Grades on the Tool Life and Wear Mechanism When Dry Turning of Titanium Alloy’, *Asian International Journal of Science and Technology in Production and Manufacturing*, 1, March 2015 (2008), 105–10

Y. Y. Tanoto, B. O. Soepangkat, and A. Wahjudi, "Optimasi Multi Respon pada Proses Gurdi dengan Menggunakan Metode Taguchi-Grey," *J. Tek. Mesin*, vol. 15, no. 1, pp. 8–14, 2014, doi: 10.9744/jtm.15.1.8-14.