

**ANALISIS MULTI VARIAN PADA PEMESINAN BOR MAGNESIUM AZ31B
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *TAGUCHI GRAY*
*RELATIONAL ANALYSIS***

(Tesis)

Oleh

**PANJI MARIO LEKSONO
NPM 2025021002**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**ANALISIS MULTI VARIAN PADA PEMESINAN BOR MAGNESIUM AZ31B
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *TAGUCHI GRAY*
*RELATIONAL ANALYSIS***

Oleh :

**PANJI MARIO LEKSONO
2025021002**

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
2024**

ABSTRAK

ANALISIS MULTI VARIAN PADA PEMESINAN BOR MAGNESIUM AZ31B DENGAN MENGGUNAKAN METODE *TAGUCHI GRAY* *RELATIONAL ANALYSIS*

Oleh

PANJI MARIO LEKSONO

Industri manufaktur merupakan suatu kegiatan yang dilakukan untuk mengubah bahan baku menjadi barang jadi yang memenuhi standar spesifikasi. Salah satu proses yang dilakukan secara mekanis yaitu proses pemesinan. Dalam proses pemesinan banyak metode yang digunakan untuk menentukan kualitas optimal dalam pengerjaannya. Metode Taguchi sering digunakan dalam menentukan kualitas optimal dalam proses manufaktur dengan respon tunggal. Namun ketika terdapat lebih dari satu respon, para peneliti sering menggunakan metode *Grey Relational Analysis (GRA)*.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mendapatkan parameter optimal pemesinan terhadap respon umur pahat, kekasaran permukaan dan pengaruh arus listrik pada material jenis Magnesium AZ31B dengan menggunakan empat faktor dan *mix level*. Diameter pahat yang digunakan adalah 8 mm dan 10 mm. Kecepatan *spindle* diatur pada 890 rpm, 1270 rpm, 1700 rpm dan 2000 rpm, *feeding* menggunakan nilai 0,1 mm/rev dan 0,3 mm/rev, sedangkan *point angle* yang digunakan adalah 118° dan 135°.

Dengan menggunakan Metode Taguchi, faktor yang memiliki kontribusi paling berpengaruh terhadap respon umur pahat namun tidak signifikan adalah *feeding* dengan kontribusi mencapai 49,77%, putaran *spindle* 30,35% dan diameter pahat 13,98%. Kemudian terhadap kekasaran permukaan memiliki kontribusi paling berpengaruh namun tidak signifikan adalah diameter pahat dengan kontribusi 29,66% dan *feeding* 29,48%. Untuk faktor pengaruh arus listrik tidak terlalu memiliki dampak signifikan, namun faktor yang memiliki kontribusi paling berpengaruh terjadi pada putaran *spindle* dengan kontribusi mencapai 38,35% dan *feeding* 21,96%. Selanjutnya dengan menggunakan Metode Taguchi GRA, hasil optimal yang diperoleh yaitu faktor *spindle* 890 rpm, *feeding* 0,1 mm/rev, *point angle* 118° dan diameter pahat 8 mm.

Kata kunci: *Drilling*, Metode Taguchi, *Grey Relational Analysis*, Umur Pahat, Keausan, Kekasaran Permukaan, Arus Listrik.

ABSTRACT

MULTI-VARIANT ANALYSIS OF AZ31B MAGNESIUM DRILL MACHINING USING THE TAGUCHI GRAY METHOD RELATIONAL ANALYSIS

By

PANJI MARIO LEKSONO

The manufacturing industry is an activity carried out to convert raw materials into finished goods that meet specification standards. One process that is carried out mechanically is the machining process. In the machining process, many methods are used to determine optimal quality in the workmanship. The Taguchi method is often used to determine optimal quality in single response manufacturing processes. However, when there is more than one response, researchers often use the Gray Relational Analysis (GRA) method.

This research aims to obtain optimal machining parameters regarding tool life response, surface roughness and the effect of electric current on Magnesium AZ31B type materials using four factors and mix levels. The chisel diameters used are 8 mm and 10 mm. The spindle speed is set at 890 rpm, 1270 rpm, 1700 rpm and 2000 rpm, feeding uses values of 0.1 mm/rev and 0.3 mm/rev, while the point angles used are 118° and 135°.

Using the Taguchi Method, the factor that has the most influential contribution to the tool life response but is not significant is feeding with a contribution of 49.77%, spindle rotation 30.35% and tool diameter 13.98%. Then, the most influential but not significant contribution to surface roughness is tool diameter with a contribution of 29.66% and feeding 29.48%. The influence factor of electric current does not have a significant impact, but the factor that has the most influential contribution occurs in spindle rotation with a contribution reaching 38.35% and feeding 21.96%. Furthermore, by using the Taguchi GRA method, the optimal results obtained were spindle factor 890 rpm, feeding 0.1 mm/rev, point angle 118° and tool diameter 8 mm.

Keywords: *Drilling, Taguchi Method, Gray Relational Analysis, Tool Wear, Surface Roughness, Electric Current.*

Judul Tesis : ANALISIS MULTI VARIAN PADA PEMESINAN BOR MAGNESIUM AZ31B DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GREY RELATIONAL ANALYSIS

Nama Mahasiswa : Panji Mario Leksono

Nomor Pokok Mahasiswa : 2025021002

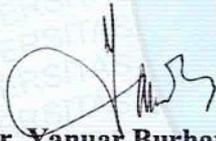
Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

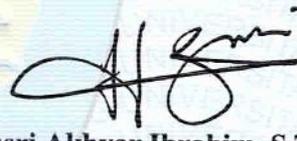
MENYETUJUI
Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota



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



Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.
P. 19710817 199802 1 003

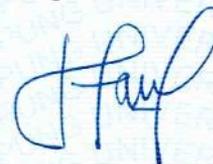
MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



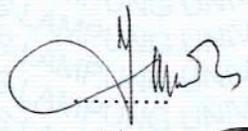
Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19710817 199802 1 003

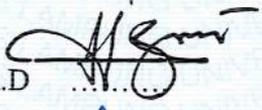


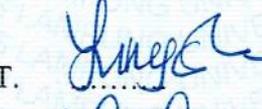
Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 19690620 200003 1 001

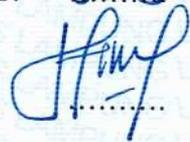
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

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 : **6 Januari 2024**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa Tesis dengan judul **“ANALISIS MULTI VARIAN PADA PEMESINAN BOR MAGNESIUM AZ31B DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GRAY 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, Januari 2024

Yang Membuat



Panji Mario Leksono

NPM. 2025021002

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Tanjung Enim, 29 November 1993, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, pasangan Bapak Alm. Slamet Supardi dan Ibu Hj. Susni, S.Pd. Penulis memiliki satu kakak laki-laki yang bernama Kuncoro Abraham dan memiliki adik perempuan yang bernama Niki Nabila Utami.

Penulis mengawali pendidikannya pada tahun 1997 di TK Al-Azhar 4 Bandar Lampung dan diselesaikan pada tahun 1998. Penulis melanjutkan sekolah di Sekolah Dasar Negeri 2 Rawa Laut Bandar Lampung pada tahun 1999 dan selesai di tahun 2005, selanjutnya tahun 2005 melanjutkan pendidikan di SMP Kartika II-2 Bandar Lampung diselesaikan pada tahun 2008, kemudian tahun 2008 melanjutkan sekolah di SMA Negeri 1 Bandar Lampung yang diselesaikan tahun 2011.

Pada tahun 2011 penulis melanjutkan studi perguruan tinggi sebagai mahasiswa di Universitas Lampung, Fakultas Teknik, Jurusan S1 Teknik Mesin dengan mengambil Konsentrasi Konversi Energi dan lulus kuliah pada tahun 2016.

Pada tahun 2020 penulis melanjutkan studi perguruan tinggi sebagai mahasiswa di Universitas Lampung, Fakultas Teknik, Jurusan S2 Teknik Mesin dengan mengambil Konsentrasi Manufaktur dan lulus kuliah pada tahun 2024.

Sekarang penulis bekerja di PT Angkasa Pura Logistik sampai dengan sekarang.

PERSEMBAHAN

Tesis ini penulis dedikasikan untuk Keluarga tersayang dan orang-orang yang selama ini selalu mendukung penulis, khususnya Mamah yang selalu menjadi motivasi dan kebanggaan penulis untuk selalu bisa membahagiakan beliau dimanapun dan kapan pun, serta untuk Almarhum Papah sebagai motivasi penulis dan kebanggaan beliau

SANWACANA

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 Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. sebagai Dosen Pembimbing utama atas kesediaannya memberikan bimbingan, arahan, saran dan masukan dalam proses penyelesaian Tesis ini.
6. Bapak Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. sebagai Dosen Pembimbing II dalam proses penyelesaian Tesis ini.
7. Bapak Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. sebagai Dosen Penguji I yang telah mengkritisi dan memberikan masukan untuk sempurnanya Tesis ini.
8. Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T. sebagai Dosen Penguji II yang juga telah mengkritisi dan memberikan masukan untuk sempurnanya Tesis ini.

9. Para dosen Pasca Sarjana Teknik Mesin yang sudah memberikan ilmu kepada saya dengan sepenuh hati.
10. Manajemen Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung, yang telah membantu proses pengujian untuk Tesis ini.
11. Para Admin Jurusan Mas Salam, Mas Martha dan Mas David serta penjaga gedung Mas Dadang yang selalu membantu penulis dalam menyiapkan administrasi dan memberikan informasi serta menyiapkan ruangan saat seminar.
12. Keluarga besar penulis Mamah (Susni), Kakak (Kuncoro Abraham), Adek (Niki Nabila Utami) dan Istri Kakak (Mba Ranty) yang selalu mendukung dan menyemangati selalu penulis yang tiada hentinya, terima kasih khususnya buat Mamah tercinta Bu Haji Susni, S.Pd. yang sudah mendukung penulis baik moral dan materil dari awal sampai penulis bisa menyelesaikan tesis ini.
13. Bapak Evan Kurniawan, S.T., M.T., Bapak Rangga Marhaendra, Bapak Ijen Finisha selaku atasan saya di tempat saya bekerja sekarang, terima kasih banyak pak atas motivasinya dan dukungannya selama ini agar penulis bisa secepatnya menyelesaikan tesis ini.
14. Bapak Kunto Widyatmoko selaku partner atasan yang pernah bekerja sama dengan penulis, terima kasih pak atas saran dan masukannya selama bekerja di perusahaan yang sekarang.
15. Teman-teman satu Divisi Facility Readiness Indra Korneawan, Lesta Febrianti, Erwin Yuliansyah, Annisa Mareta ditempat saya bekerja terima kasih atas support dan backup nya selama penulis menyelesaikan tesis ini.

16. Tim Human Capital PT Angkasa Pura Logistik Pak ditempat saya bekerja sekarang Pak Adi Safriyanto, Mba Safira Vidya S, Pak Novrizal R. Boer dan partner semeja di kantor yang sedang berjuang untuk Tesis juga Mas Rajaf Trisnawan, terima kasih selalu mendukung penulis agar bisa segera menyelesaikan tesis ini dan segera cepat wisuda.
17. Bapak Adi Yusuf Setiawan beserta istri tercinta, terima kasih atas bantuannya dalam membantu pengambilan sampel respon pada penelitian ini.
18. Temen seperjuangan 2011 yang berjuang di Magister Teknik Mesin Unila Pak Eko Wahyu S dan Pak Ahmad Kurniawan Purga yang selalu berjuang bersama dan selalu menyemangati.
19. Coach Nurcahya Nugraha, terima kasih telah mendukung dan menyemangati terus penulis untuk ingat selalu menyelesaikan tesis ini dan terima kasih telah menjadi teman diskusi obrolan yang tidak ada habisnya dalam menyelesaikan tesis ini.
20. Partner pengujian penelitian ini Mas Ivan dan Mas Muadz angkatan 2018 S1 Teknik Mesin Unila yang sudah banyak membantu penulis dalam membantu proses penelitian ini.
21. Teman – teman Angkatan 2020 Magister Teknik Mesin Universitas Lampung. Terima kasih untuk kebersamaan dan dukungannya.

Bandar Lampung, Januari 2024

Penulis,

Panji Mario Leksono

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 **“ANALISIS MULTI VARIAN PADA PEMESINAN BOR MAGNESIUM AZ31B DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI GRAY 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, Januari 2024

Penulis,

Panji Mario Leksono

DAFTAR ISI

COVER LUAR	i
COVER DALAM	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
LEMBAR PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	ix
SANWACANA	x
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	11
1.3 Batasan Masalah	11
1.4 Sistematika Penulisan	12

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Magnesium dan Paduannya	13
2.1.1. Magnesium	13
2.1.2. Sifat Fisik Magnesium	16
2.1.3. Sifat Kimia Magnesium	16
2.1.4. Sifat Mekanik Magnesium	17
2.2. Pemesinan	18
2.3. Drilling	19
2.4. Mesin Bor dan Cara Kerjanya	21
2.5. Bagian-bagian Mata Bor	22
2.6. Bahan Pahat	29
2.7. Kekasaran Permukaan	31
2.8. Perhitungan Waktu Pemotongan Benda Kerja	37
2.9. Pengukuran Daya Mesin Perkakas	40
2.10. <i>Dry Machining</i> (Pemesinan Kering)	43
2.11. Metode Taguchi	46
2.12. ANOVA (<i>Analysis of Variance</i>)	48
2.13. <i>Grey Relational Analysis</i> (GRA)	48

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian	52
3.2 Bahan	52
3.2.1 Mata Bor	52
3.2.2 Bahan Benda Kerja	54
3.3 Peralatan.....	54
3.3.1 .CNC <i>Milling Machine</i>	54
3.3.2. Kamera Mikroskop USB.....	56
3.3.3. <i>Surface Roughness Tester</i>	56
3.3.4. <i>Mastech Digital Clamp Meter</i>	57
3.4 Pengujian Pemesinan	58
3.5. Desain Eksperimen <i>Taguchi Gray Relation Analysis</i>	64
3.6. Diagram Alir Penelitian	70
3.7. Rencana Jadwal Penelitian.....	71

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian.....	72
4.2. Menghitung SN <i>Ratio</i> dan ANOVA Setiap Faktor.....	76
4.3. Analisis <i>Multi Response</i> Dengan Metode Taguchi – GRA	86
4.3.1. Normalisasi SNR.....	87
4.3.2. Mencari Nilai Delta dan Grey Relational Component (GRC)	88
4.3.3. Grey Relational Grade.....	89
4.3.4. Optimasi Nilai GRG.....	90
4.3.5. ANOVA Terhadap GRG	91

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan	93
5.2. Saran	94

DAFTAR PUSTAKA LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat Fisik Magnesium	16
Tabel 2.2 Sifat Kimia Magnesium AZ 31 B	17
Tabel 2.3 Batas Keausan Kritis.....	27
Tabel 2.4. Toleransi harga kekasaran rata-rata Ra	36
Tabel 2.5. Tingkat kekasaran rata-rata permukaan menurut proses pengerjaannya	36
Tabel 2.6 Nilai kecepatan mata potong bor dari bahan HSS	38
Tabel 2.7 Nilai kecepatan potong mata bor dari bahan HSS	38
Tabel 2.8 Besarnya pemakanan berdasarkan diameter mata bor	39
Tabel 3.1 Spesifikasi CNC Milling Machining.....	55
Tabel 3.2 Spesifikasi Kamera Mikroskop USB	56
Tabel 3.3 Spesifikasi alat <i>surface roughness tester</i>	57
Tabel 3.4 Spesifikasi alat <i>Digital Clamp Meters</i>	58
Tabel 3.5 Data <i>Run Order</i> penelitian	58
Tabel 3.6 Data Rumus Penelitian dengan Metode Taguchi.....	59
Tabel 3.7 Besaran Level.....	59
Tabel 3.8 Data Hasil Pengujian.....	60
Tabel 3.9 Hasil Percobaan dan hasil perhitungan S/N Ratio umur pahat, kekasaran permukaan dan arus listrik.	65
Tabel 3.10 Faktor optimal masing-masing respon	65
Tabel 3.11 Analisis Varian Untuk S/N Rasio Keausan Pahat, Kekasaran Permukaan dan Arus Listrik	65
Tabel 3.12 Response table S/N rasio umur pahat, kekasaran permukaan dan arus listrik	66
Tabel 3.13 Normalisasi SNR	67
Tabel 3.14 Perhitungan Deviation Sequence dan GRC	68
Tabel 3.15 Grey Relation Grade (GRG).....	69
Tabel 3.16 Rencana Penelitian	71
Tabel 4.1 Run Order Penelitian	73
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian.....	73
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan <i>Signal to Noise Ratio</i>	78
Tabel 4.4 Faktor optimal masing-masing respon	80
Tabel 4.5 Hasil perhitungan ANOVA terhadap respon umur pahat	81
Tabel 4.6 Hasil perhitungan ANOVA terhadap respon kekasaran permukaan	82
Tabel 4.7 Hasil perhitungan ANOVA terhadap respon arus listrik	82

Tabel 4.8 Hasil Optimasi S/N Rasio dan Anova	83
Tabel 4.9 Normalisasi terhadap nilai S/N Ratio	87
Tabel 4.10 Perhitungan Delta dan Grey Relational Coefficient	88
Tabel 4.11 Nilai Grey Relational Grade (GRG).....	89
Tabel 4.12 Nilai rata-rata GRG tiap factor.....	90
Tabel 4.13 Hasil perhitungan ANOVA terhadap respon GRG.....	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme kerja proses pengeboran magnesium.....	19
Gambar 2.2 Proses <i>drill machine</i>	20
Gambar 2.3 Bagian dari mesin bor / <i>bench drilling machine</i>	23
Gambar 2.4 Nama bagian mata bor.....	24
Gambar 2.5 Geram keluar.....	24
Gambar 2.6. (a) <i>Flank wear</i> , (b) <i>Crater wear</i>	26
Gambar 2.7 Bidang pahat potong (<i>flank, rake, clearance</i>).....	27
Gambar 2.8 Profil suatu permukaan.....	33
Gambar 2.9 Multimeter Digital.....	42
Gambar 2.10 Digital <i>Clamp-On Multimeter</i>	43
Gambar 3.1 Pahat bor diameter 8 mm dan 10 mm sebagai alat penelitian.....	53
Gambar 3.2 Pahat bor dengan perubahan <i>point angle</i> yang berbeda.....	53
Gambar 3.3 Ukuran Material Benda Uji.....	53
Gambar 3.4 Material uji Magnesium AZ31B.....	54
Gambar 3.5 CNC <i>Milling Machine</i>	54
Gambar 3.6 Mikroskop USB.....	56
Gambar 3.7 Alat <i>Surface Roughness Tester</i>	57
Gambar 3.8 <i>Digital Clamp Meters Voltage Current Resistance Capacitance Tester</i>	58
Gambar 3.9 Setting kamera mikroskop USB.....	61
Gambar 3.10 Titik keausan yang terjadi pada proses pengeboran.....	62
Gambar 3.11 Keausan tepi (<i>Vb</i>).....	62
Gambar 3.12 Pengukuran kekasaran permukaan.....	63
Gambar 3.13 Pengukuran arus listrik dengan clamp meter digital.....	64
Gambar 4.1 Proses pengeboran dengan tanpa pendingin (<i>dry machining</i>).....	74
Gambar 4.2 Hasil visual proses pemesinan bor pada material uji Magnesium AZ31B.....	74
Gambar 4.3 Main effect plot untuk SN Rasio Umur Pahat (<i>T</i>).....	78
Gambar 4.4 Main effect plot untuk SN Rasio Kekasaran Permukaan (<i>Ra</i>).....	79
Gambar 4.5 Main effect plot untuk SN Rasio Arus Listrik (<i>I</i>).....	79
Gambar 4.6 Grafik nilai GRG terhadap Run Order.....	89

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri manufaktur merupakan suatu kegiatan yang dilakukan untuk mengubah bahan baku, komponen atau bahan lainnya menjadi barang jadi yang memenuhi standar spesifikasi. Industri manufaktur atau industri pengolahan yaitu suatu usaha yang mengolah atau mengubah bahan mentah menjadi barang jadi ataupun barang setengah jadi yang mempunyai nilai tambah, yang dilakukan secara mekanis dengan mesin, ataupun tanpa menggunakan mesin. Industri manufaktur pada umumnya mampu memproduksi dalam skala besar (BPS, 2008).

Salah satu proses yang dilakukan secara mekanis yaitu dengan menggunakan mesin untuk mengolah bahan mentah menjadi produk yang bernilai tambah adalah proses pemesinan. Proses pemesinan merupakan sebuah proses produksi dengan menggunakan mesin perkakas dengan memanfaatkan gerakan relatif antara pahat dengan benda kerja sehingga menghasilkan suatu produk sesuai geometri dan kualitas produk yang dikehendaki (Widarto, 2008). Salah satu industri manufaktur yang menggunakan proses pemesinan yaitu industri otomotif, dimana material logam merupakan salah satu bahan yang banyak digunakan pada proses tersebut.

Magnesium adalah salah satu material logam yang semakin populer digunakan dalam berbagai industri karena memiliki sifat-sifat yang menguntungkan seperti kekuatan

yang tinggi dibandingkan dengan beratnya, kemampuan konduktivitas yang baik, dan kemampuan ketahanan korosi yang tinggi. Karena sifat-sifat ini, magnesium digunakan dalam berbagai aplikasi seperti otomotif, *aerospace*, elektronik, dan peralatan olahraga (Bronfin *et. al*, 2007). Meskipun material paduan magnesium memiliki beberapa kelebihan dalam sifat kimia dan fisiknya, pada proses pemesinan paduan magnesium dikenal sebagai material jenis logam yang mudah terbakar karena memiliki titik nyala yang rendah, terutama pada saat proses pemesinan dengan kecepatan tinggi (Sulistiyanti *et. al*, 2012). Pada titik nyala yang rendah tersebut geram akan terbakar, di mana suhu pemotongan melebihi titik cair bahan yaitu (400°C - 600°C) (Mahrudi dkk, 2013). Hal ini disebabkan oleh suhu atau titik cair material magnesium yang rendah dan sifat magnesium yang mudah terbakar (*flammable*). Pada saat proses pemesinan magnesium berlangsung, gesekan antara benda kerja dan pahat potong dapat menimbulkan panas dan temperatur yang dicapai tinggi sehingga menimbulkan api. Demikian juga gesekan antara geram dan permukaan atas pahat menimbulkan panas yang tinggi, bahkan panas yang dihasilkan dapat menyebabkan geram terbakar (Childs T., *et. al*, 2000).

Banyak penelitian yang telah dilakukan khususnya pada proses pemesinan terhadap suatu material benda kerja untuk mengetahui berbagai faktor yang bisa mempengaruhi kualitas proses pemesinan tersebut, (Hamni dkk, 2020) pernah melakukan penelitian umur pakai pahat HSS pada pemesinan bor magnesium AZ31 dan untuk mendukung penelitian tersebut digunakan Metode Taguchi untuk menganalisa pembahasan hasil penelitian. Parameter pemesinan bor yang digunakan yaitu mata bor HSS (*High Speed Steel*) dengan ukuran (10 mm, 12 mm, dan 14 mm), kecepatan putaran (635 RPM, 970 RPM, 1420 RPM) dan menggunakan gerak makan (0,10 mm/rev, 0,18 mm/rev dan

0,24 mm/rev), dengan kedalaman potong 50 mm. Pengambilan data keausan pahat dilakukan menggunakan mikroskop digital USB dengan perbesaran 50x. Data keausan pahat dilihat setiap satu kali proses pengeboran dan proses pemesinan akan dihentikan jika mata bor sudah mengalami aus. Umur pahat tertinggi diperoleh pada diameter bor 10 mm dengan kecepatan putaran 635 RPM dan menggunakan gerak makan 0,10 mm/rev yaitu selama 12,74 menit, sedangkan umur pahat terendah diperoleh pada diameter bor 14 mm dengan kecepatan putaran 1420 RPM dan menggunakan gerak makan sebesar 0,18 mm/rev yaitu selama 0,68 menit. Berdasarkan varian (ANOVA) parameter yang signifikan dalam mempengaruhi umur pakai mata bor adalah kecepatan putaran (n). Semakin besar kecepatan putaran (n) maka keausan mata bor akan semakin cepat terjadi, hal tersebut disebabkan karena suhu tinggi yang dihasilkan dari gesekan antara mata bor dan benda kerja.

Berbeda dengan (Sultan dkk, 2015) melakukan penelitian pemesinan pengeboran terhadap keausan pahat dan kualitas lubang dalam hal kesalahan diameter, kebulatan, silinder serta kekasaran permukaan menggunakan material *Austenitic Stainless Steel* AISI 316L sebagai material benda kerjanya. Pengeboran dilakukan dengan menggunakan alat pahat *uncoated carbide* dengan diameter $4 \pm 0,01$ mm dengan sudut titik 135° dan sudut heliks 30° . Pengeboran dilakukan pada berbagai tingkat kecepatan spindle (18 dan 30 mm⁻¹) dan laju pemakanan (0,03, 0,045 dan 0,06 mm^{rev}-1). Analisis perbandingan dilakukan terhadap diameter lubang, kebulatan, silindrisitas, dan kekasaran permukaan lubang bor dengan percobaan. Dari hasil tersebut, karakteristik kualitas lubang sebagian besar dipengaruhi oleh kecepatan potong dan laju pemakanan. Sebuah pengecualian adalah untuk kesalahan sirkularitas dimana menunjukkan bahwa kecepatan potong dan laju pemakanan tidak memberikan pengaruh yang signifikan

terhadap kesalahan sirkularitas. Saat kecepatan potong meningkat, kekasaran permukaan menurun ($1,09 \mu\text{m}$). Kebalikan, ketika *feed rate* meningkat maka nilai kekasaran permukaan juga meningkat. Untuk kesalahan silinder, kecepatan potong lebih rendah dan lebih rendah laju umpan akan memberikan hasil yang lebih baik. Dalam hal kesalahan diameter, laju pemakanan lebih berpengaruh daripada kecepatan potong. Kesalahan diameter minimum dicapai ketika kecepatan potong rendah dan laju umpan rendah digunakan.

Selanjutnya (Santhakumar dan Iqbal, 2022) melakukan investigasi pengaruh parameter pemesinan dan optimum input optimal pada karakteristik *machinability* paduan magnesium AZ31 selama proses milling. Parameter input yang dipilih adalah kedalaman potong, kecepatan makan dan kecepatan potong. Output yang diukur adalah kekasaran permukaan dan deviasi radius keausan pahat. Array ortogonal Taguchi L9 dirancang untuk tiga parameter input dan desain tiga level. Berdasarkan rasio S/N Taguchi, faktor input ideal diperoleh untuk kekasaran permukaan minimum dan deviasi radius keausan pahat. Kombinasi optimal dari parameter proses ditentukan dengan menggunakan Gray Analysis untuk mendapatkan kualitas permukaan yang lebih baik dan mengurangi deviasi keausan pahat.

(Astanto L. P. G. D. dkk, 2020) melakukan penelitian multi respon keausan pahat dan kekasaran permukaan benda kerja dengan tiga level dan empat faktor pada proses milling. Untuk diameter pahat dipakai pahat 6, 8 dan 10 mm. Kedalaman makan yang dipakai 1, 1,5 dan 2 mm. Kecepatan *spindle* pada 910, 1280 dan 1700 rpm. Sedangkan kecepatan pemakanan pada 75, 145, dan 220 mm/menit. Hasil optimal yang didapat pada kondisi diameter pahat 6 mm, kedalaman makan 1,5

mm, kecepatan *spindle* 1280 rpm serta kecepatan pemakanan 75 mm/menit. Respon optimal yang didapatkan adalah keausan pahat 0,059 mm serta kekasaran permukaan benda kerja 0,364 μm . Faktor yang signifikan berpengaruh adalah kecepatan pemakanan berpengaruh sebesar 76,14 %.

(Khushboo. S. *et al*, 2020) melakukan studi eksperimental dilakukan untuk mengoptimalkan parameter pemesinan AA6082. Faktor kontrol seperti cairan pemotongan (present - absent), kecepatan *spindle* (520 rpm – 420 rpm), laju pemakanan (120 mm/mnt – 80 mm/mnt) dan kedalaman lubang (16 mm – 24 mm) diperhitungkan untuk mengoptimalkan respon *Material Removal Rate* (MRR) dan kekasaran permukaan. Susunan ortogonal L18 Taguchi dipilih untuk uji coba eksperimental. Analisis Taguchi GRA digunakan untuk menemukan, parameter proses mana yang paling mempengaruhi permukaan akhir dengan persentase kontribusinya secara individual. Temuan untuk kombinasi multi-performa optimal terbaik parameter pengeboran AA 6082 adalah A2B3C1D3 yaitu dengan cutting fluid absen, kecepatan 420 rpm, feed of 120 mm/menit dan kedalaman lubang 24 mm. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa diantara semua faktor kontrol, *feed rate* (74,82%) merupakan faktor yang memberikan kontribusi tertinggi, di ikuti dengan *cutting fluid* (11,42%).

(Gonsalves *et al.*, 2020) melakukan studi tentang kinerja milling heliks untuk pemrosesan lobang pada Magnesium AZ31. Parameter yang dipertimbangkan pada penelitian ini adalah dua jenis pahat berbeda spiral *end mill* \varnothing 8 mm dan *drill bit* \varnothing 12 mm, kecepatan *spindle* di 2000, 4000, 6000 RPM, *feed per tooth* 0,05, 0,1, 0,15 mm/z, gerak makan 0,5, 1,5, 2,5 mm/rev. Dari studi tersebut, diketahui bahwa proses pengeboran heliks menguntungkan karena menghasilkan gaya pemesinan dan nilai

suhu yang lebih rendah serta menghasilkan lubang yang relatif bebas duri dengan hasil akhir yang lebih baik dibandingkan dengan pengeboran paduan Magnesium AZ31.

(Tajdeen *et al*, 2018) melakukan penelitian tentang pengeboran paduan magnesium AZ31 dengan tebal 20 mm dilakukan dengan tiga parameter berbeda dengan *orthogonal array* L9 untuk menemukan kondisi optimal untuk operasi pengeboran mikro magnesium AZ31 paduan. Pahat yang digunakan yaitu HSS dilapisi dengan Karbida, dengan variasi diameter 6 mm, 7 mm dan 8 mm, dengan kecepatan spindel 2000, 2500 dan 3000 rpm serta kecepatan pemakan 1,8 mm/rev, 2,1 mm/rev dan 2,4 mm/rev. Untuk kondisi operasi pengeboran mikro yang optimal, diameter pahat, kecepatan spindel, dan kecepatan pemakanan diambil sebagai parameter proses dan tingkat pemindahan material, kesalahan sirkularitas dipilih sebagai parameter respons. Eksperimental hasil menunjukkan bahwa karakteristik multi-respon dari paduan Magnesium AZ31 dalam pengeboran, proses pengeboran dapat ditingkatkan melalui metode *Grey Relational Analysis* (GRA). Analisis varian dilakukan untuk menentukan faktor penting untuk proses pengeboran. Kombinasi parameter yang dioptimalkan diperoleh dengan menggunakan GRA adalah Kecepatan spindel 1,8 mm/putaran, ukuran bor 8 mm dan nilai output yang sesuai adalah Tingkat Penghapusan Material (MRR) 1229,31 mm³/mnt dan kesalahan sirkularitas 8,65 μ m.

(Ibrahim dkk, 2019) melakukan penelitian dengan parameter sudut mata pahat (*point angle*), pelumas dan parameter pengeboran dianalisa untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai kekasaran permukaan, kebulatan dan ketegaklurusan. Pada penelitian ini disain yang digunakan adalah Metode Taguchi L18 yang terdiri dari 3 faktor 3 level dan 1 faktor 2 level. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekasaran permukaan

dipengaruhi oleh adanya kontribusi dari sudut mata pahat 18,9% dan lubrikan 14,5%. dimana sudut mata pahat adalah 65° dengan lubrikan minyak sintetis. Kebulatan dipengaruhi oleh sudut mata pahat 45° dari proses pengeboran, terutama jika terjadi interaksi pada kadar pemakanan 0,2 mm/rev dan lubrikan sintetis. Keakuratan sisi potong/*cutting edge* berakibat pada gaya tangensial sehingga berpengaruh pada kestabilan putaran dan kebulatan hasil pengeboran. Nilai ketegaklurusan magnesium AZ31 dalam proses pengeboran sangat dipengaruhi pula oleh parameter pemotongan kadar pemakanan yang menghasilkan signifikansi $P = 0,044$, sedangkan nilai signifikansi yang paling tinggi adalah interaksi antara kadar pemakanan 0,1 mm/rev dengan lubrikan sintetis pada $P = 0,041$.

(Susastro dkk, 2022) melakukan penelitian tentang identifikasi parameter energi listrik yang digunakan untuk menggerakkan mesin CNC Milling yang ada pada laboratorium CNC Sekolah Vokasi Undip. Mesin CNC yang ada digunakan untuk melakukan machining pada benda kerja dengan bahan dasar Aluminium 5052 dengan beberapa parameter pemotongan yang diberikan. Adapun parameter pemotongan yang diberikan diantaranya seperti kedalaman pemakanan sebesar 0,3 mm, kecepatan *spindle* sebesar 2000 Rpm. Dengan mengasumsikan bahwa mesin digunakan pada kondisi *roughing* dan *finishing*, maka parameter pemotongan untuk gerak pemakanan yang diberikan juga divariasikan pada kisaran antara 250 mm/min hingga 1250 mm/min. Dari proses machining dengan mesin CNC yang ada, kemudian dilakukan pengukuran besar parameter energi listrik dengan menggunakan Power Meter 5350 Schneider. Proses pengukuran dilakukan pada ketiga fasa listrik (fasa R, S, dan T) yang masuk pada mesin CNC. Dari hasil penelitian ditunjukkan bahwa Nilai arus listrik yang dibutuhkan untuk melakukan machining pada fasa S lebih tinggi dari pada fasa R dan T. Dengan

nilai tegangan listrik yang hampir sama pada ketiga fasa ini maka nilai daya terbesar terjadi pada fasa S dengan nilai sebesar 0,385 KW, diikuti oleh fasa R dengan nilai sebesar 0,3432 KW dan fasa T dengan nilai sebesar 0,293 KW.

(Febrima S. L. dkk, 2023) melakukan analisis pada pengaruh kondisi pemotongan terhadap konsumsi energi listrik pada mesin freis HERCUS 7264. Penelitian dilakukan secara eksperimen, yaitu dengan melakukan pengujian pada mesin freis dengan bervariasi 12 putaran mesin freis untuk mendapatkan data arus listrik pada setiap putaran. Jenis metode penelitian ini metode kuantitatif yang digunakan untuk mendapatkan pengaruh variabel bebas satu variabel berupa kecepatan potong terhadap variabel terikat berupa konsumsi energi listrik pada mesin freis HERCUS 7264. Hasil dari penelitian ini adalah menunjukkan bahwa secara aktual terjadi hubungan kecepatan potong terhadap konsumsi energi listrik turun naik, yaitu dengan bertambahnya kecepatan potong, maka konsumsi energi listrik, pada mesin freis HERCUS 7264, cenderung melandai. Dari hasil analisis statistik diperoleh persamaan garis regresi $\hat{y} = 8440,594 + 1,773x$ yang memprediksi bahwa setiap bertambahnya kecepatan potong 1 m/menit, maka konsumsi energi listrik pada mesin freis HERCUS 7264, akan bertambah sebesar Rp. 1,773 J. Dari hasil uji signifikan menunjukkan bahwa kondisi pemotongan berupa kecepatan potong tidak berpengaruh signifikan terhadap konsumsi energi listrik hasil proses freis HERCUS 7264 yang ada di Laboratorium Teknik Mesin Unsrat.

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah ditelusuri, salah satu proses pemesinan yang banyak dilakukan adalah pemesinan bor (*drilling*) dengan menggunakan material magnesium. Pengeboran (*drilling*) adalah proses pembuatan lubang dengan cara

menekan sebuah mata pahat yang berputar pada benda kerja, dimana dalam pengeboran magnesium dipengaruhi banyak faktor terkait keandalannya (El-Hofy, 2013). Salah satu permasalahan yang mempengaruhi hal tersebut adalah keausan pahat. Dalam proses permesinan bor ada beberapa variabel yang mempengaruhi keausan pahat, seperti dalam penelitian (Ibrahim dkk, 2019) menyatakan bahwa peningkatan gerak makan (f) dan peningkatan nilai kecepatan putaran (n) akan meningkatkan keausan tepi pahat, dan pemberian pelumas akan mengurangi keausan yang terjadi pada pahat. Kemudian kondisi kecepatan potong yang tinggi dan pemakanan yang besar sehingga bisa membuat geram / *chip* cepat terbakar karena terlambat keluar pahat dari lubang sehingga perlu dicarikan solusi misalnya dengan pemilihan pahat bor yang sesuai. Faktor lainnya yang merupakan salah satu karakteristik kualitas kritis yang penting pada proses pemesinan adalah kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan memiliki peranan penting karena dapat mempengaruhi koefisien gesek dari suatu komponen apabila komponen tersebut dipasangkan dengan komponen lainnya. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kehalusan permukaan antara lain jenis proses pemesinan, parameter pemotongan, dan penggunaan cairan pendingin yang benar, baik jenis maupun perbandingan komposisi antara cairan pendingin itu sendiri dengan air (Ansyori dan Saputra, 2019). Hal ini perlu diperhatikan agar kekasaran permukaan dan kualitas produk yang dihasilkan sesuai dengan keinginan. Selanjutnya setelah sudah mengetahui kondisi respon terhadap proses pemesinan bor, maka diperlukan juga untuk mengetahui kondisi keandalan mesin bor yang digunakan. Salah satunya adalah mengukur arus listrik yang terjadi selama proses pemesinan bor. Dengan melakukan pengukuran secara fisik untuk mengukur arus yang mengalir pada mesin perlu digunakan peralatan

yang dapat mengukur nilai tersebut. Kordonowy (2002), menyarankan untuk pengukuran konsumsi daya dilakukan dalam kondisi pemotongan yang berbeda. Nantinya penggunaan alat tersebut dapat mengetahui nilai arus listrik yang dibutuhkan pada saat proses pemesinan, sehingga dapat ditentukan kenaikan nilai signifikan yang terjadi untuk mengetahui keandalan mesin bor tersebut.

Berdasarkan kondisi di atas dan penelitian yang sudah dilakukan, penulis tertarik untuk melakukan penelitian lebih dalam pada pemesinan bor terhadap material magnesium. Adapun jenis magnesium yang digunakan adalah Magnesium AZ31B dilakukan dalam kondisi pemesinan kering (*dry machining*) dengan menggunakan variasi parameter kecepatan putaran *spindle*, pemakanan, sudut *point angle* pahat dan diameter pahat bor. Dalam parameter tersebut di dapatkan 4 faktor dan mix level terhadap 3 respon sehingga di dapat data *run order* L8. Dalam penelitian sebelumnya (Tajdeen *et al*, 2018 : Ibrahim dkk, 2019 : Hamni dkk, 2020) sudah pernah melakukan pemesinan bor Magnesium AZ31 namun belum terhadap Magnesium AZ31B, kemudian pada penelitian tersebut belum dilakukannya analisa respon terhadap kondisi umur pahat, kekasaran permukaan dan pengaruh arus listrik dengan menggunakan metode *Taguchi Grey Relational Analysis*. Oleh karena itu penelitian ini nantinya dari hasil pengujian yang dilakukan akan melakukan analisa respon dengan metode optimasi yang digunakan yaitu Metode *Taguchi Grey Relational Analysis (GRA)* sehingga mendapatkan nilai optimal pada hasil pemesinan bor magnesium AZ31B terhadap faktor respon umur pahat, kekasaran permukaan dan pengaruh arus listrik.

Harapannya hasil dari penelitian ini nantinya akan bermanfaat bagi industri yang menggunakan material magnesium AZ31B dalam menggunakan proses pemesinan bor magnesium AZ31B pada proses produksinya. Kemudian dapat meningkatkan efisiensi

dan kualitas produksi serta dapat membantu dalam meningkatkan pemahaman tentang sifat-sifat material magnesium AZ31B.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

- a. Mengaplikasikan Metode Taguchi untuk menganalisis faktor-faktor dan parameter yang berpengaruh pada multi varian pemesinan bor magnesium.
- b. Mengaplikasikan Metode Taguchi *Grey Relational Analysis* untuk mendapatkan kondisi optimum dari faktor-faktor dan parameter yang berpengaruh pada multi varian pemesinan bor magnesium.

1.3 Batasan Masalah

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

1. Ketebalan plat yang akan dibuat lubang pada AZ31B maksimal 25 mm dengan diameter lubang 8 mm dan 10 mm.
2. Material magnesium yang digunakan adalah AZ31B.
3. Pahat yang digunakan jenis *twist drill* HSS , diameter 8 mm dan 10 mm.
4. Pemesinan bor dilakukan secara CNC.
5. Penelitian ini difokuskan pada proses pemesinan bor (*drilling*) dengan kondisi pemesinan kering (*dry machining*).

1.4 Sistematika Penulisan

BAB I. Pendahuluan: Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Batasan Masalah, Sistematika Penulisan, Judul Sub Bab.

BAB II. Tinjauan Pustaka : Magnesium, Pemesinan, *Drilling*, Keausan Pahat, Bahan Pahat, Kekasaran Permukaan, *Dry Machining*, Metode Taguchi, *Grey Relational Analysis*.

BAB III. Metodologi Penelitian, judul subbab, Tempat Penelitian, Bahan, Peralatan, Pengujian Pemesinan, Pengujian Taguchi *Grey Relational Analysis*, Diagram Alir Penelitian.

BAB IV. Hasil dan Pembahasan : Menjelaskan data hasil pengujian, Pembahasan Nilai Keausan Pahat dan Kekasaran Permukaan Hasil Parameter Pengujian dan Analisis dengan Metode Taguchi *Grey Relational Analysis*.

BAB V. Simpulan dan Saran: menjelaskan hasil kesimpulan dari bab sebelumnya dan memberikan saran untuk penelitian yang akan dilaksanakan kemudian

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Magnesium dan Paduannya

2.1.1. Magnesium

Magnesium adalah logam yang ringan ($1,74 \text{ g/cm}^3$), 1,6 kali lebih ringan dari Al dan 4,5 kali lebih ringan dari baja. Ketangguhan patahnya lebih besar dari biomaterial keramik dan modulus elastisnya adalah 45 GPa yang mendekati modulus elastis tulang manusia (10-40 GPa) (Witte, 2008).

Magnesium sangat bermanfaat untuk tubuh manusia, dimana ion Mg^{2+} adalah elemen yang dibutuhkan dalam jumlah yang besar untuk digunakan sebagai reaksi metabolisme dan mekanisme biologis. Kebutuhan Mg setiap hari untuk orang dewasa adalah sekitar 300-400 mg dan jika berlebih semestinya dikeluarkan melalui urin atau kotoran (Zhang, 2012).

Seperti yang diterangkan oleh Harwig bahwa di dalam 70 kg tubuh manusia tersimpan 1 ml magnesium, dengan perkiraan setengah jumlah magnesium tersebut terdapat dalam jaringan tulang. Sebagai tambahan, magnesium merupakan faktor ke dua memperbanyak enzim dan dapat menstabilkan struktur DNA dan RNA (Harwig, 2001).

Aplikasi senyawa Magnesium digunakan sebagai bahan tahan api dalam lapisan dapur api untuk menghasilkan logam (besi dan baja, logam *nonferrous*), kaca, dan semen. Dengan kepadatan hanya dua pertiga dari

aluminium, magnesium memiliki banyak aplikasi dalam kasus di mana berat yang ringan sangat penting, yaitu dalam konstruksi pesawat terbang dan rudal. Magnesium juga memiliki banyak kegunaan kimia dan sifat metalurgi yang baik, sehingga membuatnya sesuai untuk berbagai aplikasi non-struktural lainnya. Magnesium banyak digunakan dalam industri dan pertanian.

Untuk aplikasi teknik, magnesium memiliki ketahanan korosi yang rendah, khususnya dalam larutan elektrolit dan lingkungan cair sehingga sesuai untuk aplikasi biomaterial. Bila magnesium berada dalam kondisi cair, maka oksida beracun yang membahayakan akibat larutan korosi dapat diekskresikan dalam urin. Namun sifat kelarutan yang tinggi juga menjadi kelemahan untuk magnesium murni, dimana dapat menimbulkan korosi yang cepat dalam pH fisiologis (7,4-7,6) dan di lingkungan fisiologis klorida tinggi, sehingga sifat mekanik menurun sebelum penyembuhan dan pertumbuhan jaringan baru. Inilah menjadi pendorong untuk memadukan magnesium dengan unsur-unsur lain, diharapkan nantinya menjadi material implant yang tidak beracun dan biokompatibilitas yang baik, mampu digunakan pada bagian-bagian yang sering kena beban dan mampu bertahan sampai 12-18 minggu sampai jaringan tulang sembuh dan tumbuh (Witte, 2005 dan Wen, 2001).

Magnesium adalah unsur kimia dalam Tabel periodik yang memiliki symbol Mg dan nomor atom 12 serta berat atom 24,31. Magnesium adalah elemen terbanyak kedelapan yang membentuk 2% berat kulit bumi, serta merupakan unsur terlarut ketiga terbanyak pada air laut. Logam alkali tanah ini terutama

digunakan sebagai zat campuran (*alloy*) untuk membuat campuran aluminium-magnesium yang sering disebut "*magnalium*" atau "*magnelium*".

Magnesium merupakan salah satu jenis logam ringan dengan karakteristik sama dengan aluminium tetapi magnesium memiliki titik cair yang lebih rendah dari pada aluminium. Seperti pada aluminium, magnesium juga sangat mudah bersenyawa dengan udara (Oksigen). Perbedaannya dengan aluminium ialah dimana magnesium memiliki permukaan yang keropos yang disebabkan oleh serangan kelembaban udara karena *oxid film* yang terbentuk pada permukaan magnesium ini hanya mampu melindunginya dari udarayang kering. Unsur air dan garam pada kelembaban udara sangat mempengaruhi ketahanan lapisan oxid pada magnesium dalam melindunginya dari gangguan korosi. Untuk itu benda kerja yang menggunakan bahan magnesium ini diperlukan lapisan tambahan perlindungan seperti cat. Magnesium murni memiliki kekuatan tarik sebesar 110 N/mm² dalam bentuk hasil pengecoran (*Casting*), angka kekuatan tarik ini dapat ditingkatkan melalui proses pengerjaan. Magnesium bersifat lembut dengan modulus elastis yang sangat rendah. Magnesium memiliki perbedaan dengan logam-logam lain termasuk dengan aluminium, besi tembaga dan nikel dalam sifat pengerjaannya dimana magnesium memiliki struktur yang berada didalam kisi hexagonal sehingga tidak mudah terjadi slip. Disamping itu, presentase perpanjangannya hanya mencapai 5 % dan hanya mungkin dicapai melalui pengerjaan panas.

2.1.2. Sifat Fisik Magnesium

Tabel 2.1. Sifat Fisik Magnesium

Sifat fisik	Magnesium paduan
Titik Cair	922 K
Titik Didih	1380 K
Energi Ionisasi I	738 kJ/mol
Energi Ionisasi II	1450 kJ/mol
Kerapatan massa (ρ)	1,74 g/cm ³
Jari-jari atom	1,60 Å
Kapasitas Panas 1,02 J/gK	1,02 J/gK
Potensial Ionisasi	7,646 Volt
Konduktivitas Kalor	156 W/mK
Entalpi Penguapan	127,6 kJ/mol
Entalpi Pembentukan	8,95 kJ/mol

Sumber: www.digilib.its.com, <http://digilib.unila.ac.id/1150/4/BAB%20II.pdf>

2.1.3. Sifat Kimia Magnesium

1. Magnesium oksida merupakan oksida basa sederhana.
2. Reaksi dengan air: $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$
3. Reaksi dengan udara: Menghasilkan MO dan M₃N₂ jika dipanaskan.
4. Reaksi dengan Hidrogen: tidak bereaksi
5. Reaksi dengan klor: $\text{M} + \text{X}_2 \rightarrow (\text{dipanaskan}) \rightarrow \text{MX}_2$ (garam)

Tabel 2.2 Sifat Kimia Magnesium AZ 31 B

Weight	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ca	Fe	Ni	Others	Mg
Magnesium	2,5	0,7	0,2	0,05	0,05	0,05	0,005	0,005	0,3	Bal
AZ31B	–	–	min	min	max	max	max	max	max	
	3,5	1,3							total	

Sumber : www.sciencedirect.com/science/article/.../S026322411400281...

2.1.4. Sifat Mekanik Magnesium

Rapat massa magnesium adalah 1,738 gram/cm³. Magnesium murni memiliki kekuatan tarik sebesar 110 N/mm² dalam bentuk hasil pengecoran/*casting* (Yunus, 2012).

Paduan magnesium adalah material yang mampu luruh (*degradable*) sehingga perkembangannya sebagai biomaterial sangat pesat. Magnesium merupakan material yang secara alami dibutuhkan dalam tubuh manusia dan digunakan untuk pertumbuhan tulang darah. Namun kelemahan magnesium adalah laju degradasinya sangat tinggi sehingga perlu pengontrolannya agar sesuai dengan pertumbuhan jaringan baru.

Faktor-faktor yang menjadi pertimbangan magnesium, sebagai biomaterial adalah (Witte, 2008):

1. Larutan produk korosi magnesium yang terjadi dalam tubuh tidak memberikan efek yang berbahaya bahkan diperlukan untuk metabolisme tubuh dan mekanisme biologis.
2. Salah satu karakteristik korosi paduan magnesium adalah bahwa paduan ini terkorosi hanya dibagian yang terkena cairan.

3. Pengaruh suhu tubuh sekitar 37°C adalah suhu yang cocok untuk paduan magnesium sehingga degradasi magnesium mudah untuk dikontrol
4. Pengaruh protein dalam larutan tubuh dapat juga mengontrol degradasi paduan Mg.

2.2 Pemesinan

Pemesinan adalah suatu proses produksi menggunakan mesin perkakas dengan memanfaatkan gerakan relatif antara pahat dengan benda kerja sehingga menghasilkan suatu produk sesuai dengan hasil geometri yang diinginkan. Logam dapat dipisahkan kedalam bagian – bagian / geram dengan menggunakan sebuah perkakas dan banyak sumber energi lain untuk memisahkannya. (Chaplin, 1976). Teknik pembentukan logam menggunakan perkakas dengan cara membuang bagian material yang tidak diperlukan, lebih dikenal dengan istilah proses pemesinan. Dalam proses pemesinan ini, perkakas yang digunakan untuk membuang material bersifat tajam, karena berfungsi menyayat benda kerja dengan ketebalan tertentu (Kalpakjian and Schmid, 2001).

Prinsip kerja proses pemesinan adalah dengan cara menempatkan benda kerja yang akan dipotong di atas meja potong. Untuk mendapatkan benda keadaan yang kaku digunakan komponen pencekam, agar benda kerja tidak dapat bergerak sewaktu proses pemesinan. Jika benda kerja tidak dalam kondisi kaku pada saat proses pemesinan berlangsung, dapat menyebabkan kerusakan pada geometri komponen atau merusak ketelitian. Secara detail, cara kerja proses pemesinan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1,



Gambar 2.1 Mekanisme kerja proses pengeboran magnesium
(Boothroyd, 1975)

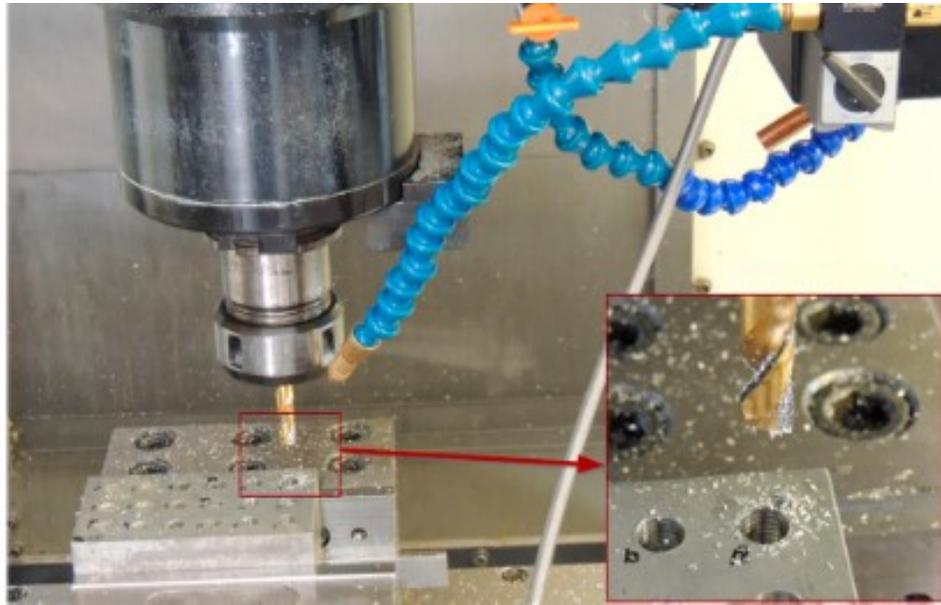
Proses pemesinan dapat diklasifikasikan dalam dua klasifikasi besar yaitu proses pemesinan untuk membentuk benda kerja silindris atau konis dengan benda kerja atau pahat berputar, dan proses pemesinan untuk membentuk benda kerja permukaan datar tanpa memutar benda kerja.

Klasifikasi yang pertama meliputi proses bubut dan variasi proses yang dilakukan dengan menggunakan mesin bubut, mesin gurdi (*drilling machine*), mesin frais (*milling machine*), mesin gerinda (*grinding machine*). Klasifikasi kedua meliputi proses sekrap (*shapingplaning*), proses slot (*sloting*), proses menggergaji (*sawing*), dan proses pemotongan roda gigi (*gear cutting*) (Chaplin, 1976).

2.3. *Drilling*

Salah satu proses permesinan yang sering digunakan adalah pengeboran atau *drilling*. Bor itu sendiri adalah salah satu mesin perkakas, yang secara umum digunakan untuk mengebor suatu benda kerja. Pada mesin bor ini juga dapat dilakukan pekerjaan yang lainnya seperti, memperluas lubang, pengeboran untuk tirus pada bagian suatu lubang atau pembedaman. Dalam

pelaksanaannya pengeboran sesungguhnya adalah suatu poros yang berputar, dimana pada bagian ujungnya (bagian bawah) disambungkan mata bor yang dapat mengebor terhadap benda kerja yang di jepit pada meja mesin bor (Hendra, 2005).



Gambar 2.2 Proses *drill machie* (Berzosa, F., 2020)

Jadi secara umum dalam pelaksanaan pengeboran suatu lubang pada benda kerja diperlukan suatu mesin bor yang bekerja baik dan teliti. Mesin dapat mengebor benda kerja secara terus menerus dan mempunyai kecepatan poros yang dapat disetel menurut kebutuhannya dan dapat dilakukan bermacam-macam pengeboran yang sesuai kebutuhan.

Menurut Rahdiyanta (2010), mengacu pada panduan bahwa karakteristik proses pengeboran agak berbeda dengan proses pemesinan yang lain, yaitu:

1. Geram harus keluar dari lubang yang dibuat.
2. Geram yang keluar dapat menyebabkan masalah ketika ukurannya besar dan atau kontinyu.
3. Proses pembuatan lubang bisa sulit jika membuat lubang yang dalam.
4. Untuk pembuatan lubang dalam pada benda kerja yang besar, cairan pendingin dimasukkan ke permukaan potong melalui tengah mata bor.

Mesin bor mempunyai prinsip dasar gerakan yaitu gerakan berputar *spindle* utama (n) dan gerakan/laju pemakanan (f).

1. Putaran mata bor (n)

Gerakan putaran mata bor ini merupakan gerakan berputarnya *spindle* mesin bor. Gerakan ini sering disebut gerakan utama (*main motion*). Besarnya putaran *spindle* yang diperlukan tergantung oleh material benda kerja, material mata bor dan diameter mata bor. Gerakan kepala utama ini diukur dalam m/menit.

2. Laju pemakanan (f)

Laju pemakanan adalah gerakan turunnya mata bor menuju benda kerja tiap satuan waktu. Besarnya laju pemakanan ini mempengaruhi kualitas permukaan hasil lubang. Laju pemakanan diukur dalam mm/putaran

2.4. Mesin Bor dan Cara Kerjanya

Mesin bor dibagi menjadi tujuh macam yakni mesin bor meja, mesin bor tangan (pistol), mesin bor radial, mesin bor tegak (*vertical drilling machine*), mesin bor koordinat, mesin bor rantai, mesin bor berporos (mesin bor gang). Salah satu mesin bor yang sering digunakan adalah mesin bor meja, yaitu mesin bor yang diletakkan diatas meja. Mesin ini digunakan untuk membuat lobang benda kerja dengan diameter kecil (terbatas sampai dengan diameter 16 mm). Prinsip kerja

mesin bor meja adalah putaran motor listrik diteruskan ke poros mesin sehingga poros berputar. Selanjutnya poros berputar yang sekaligus sebagai pemegang mata bor dapat digerakkan naik turun dengan bantuan roda gigi lurus dan gigi rack yang dapat mengatur tekanan pemakanan saat pengeboran. Bagian utama mesin bor meja adalah sebagai berikut

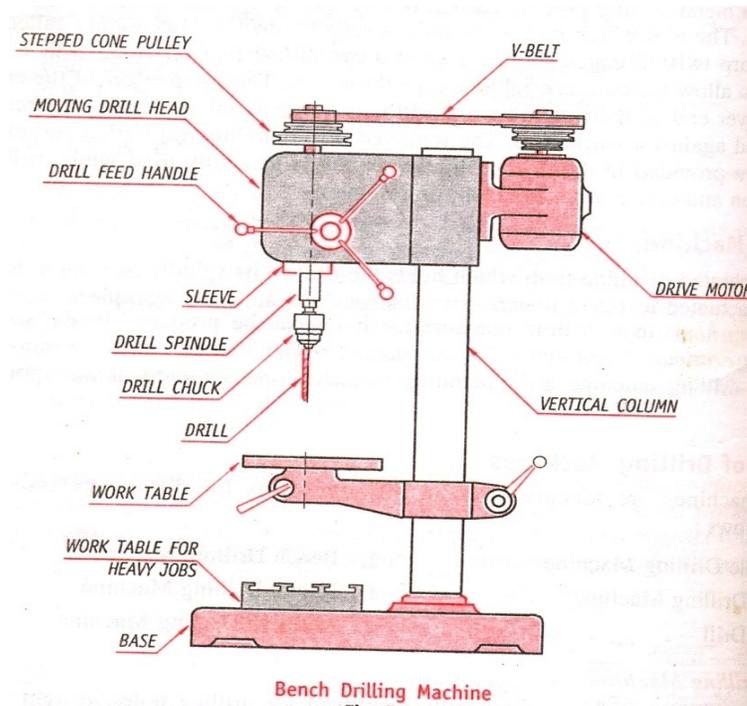
1. *Spindle* pada mesin bor berfungsi menggerakkan mata bor.
2. *Drill head* pada mesin bor berfungsi menopang mekanisme penggerak pisau potong dan menghantarkan ke benda kerja
3. Lengan radial, bagian dari mesin bor radial yang dapat bergerak naik turun maupun berputar dimana motor penggerak dan drill head terpasang kuat
4. Meja, bagian yang menopang seluruh bagian mesin bor dimana meja terbuat dari material besi cor dengan kekuatan yang tinggi dan stabilitas yang mantap.

2.5. Bagian-bagian Mata Bor

Adapun bagian-bagian mata bor menurut Rahdiyanta (2010), dapat dijabarkan sebagai berikut :

1. Elemen Pahat
 - a. Badan (*body*), adalah bagian pahat diameter 6 mm yang dibentuk untuk mata potong atau tempat untuk sisipan pahat.
 - b. Pemegang/ gagang (*shank*), adalah bagian pahat yang dipasangkan pada mesin perkakas. Bila bagian ini tidak ada, maka fungsinya diganti oleh lubang pahat.

- c. Sumbu pahat (*tool axis*), adalah garis maya yang digunakan untuk mendefinisikan geometri pahat bor. Umumnya merupakan garis tengah dari pemegang.

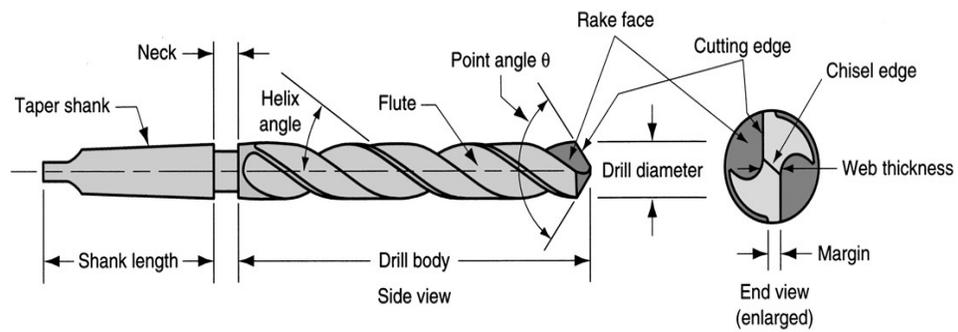


Gambar 2.3 Bagian dari mesin bor /*benchdrilling machine*(Chaplin, 1976)

2. Bidang Pahat

Merupakan permukaan aktif pahat. Setiap pahat mempunyai bidang aktif sesuai dengan jumlah mata potongnya (tunggal atau jamak). Dua bidang aktif dari pahat adalah :

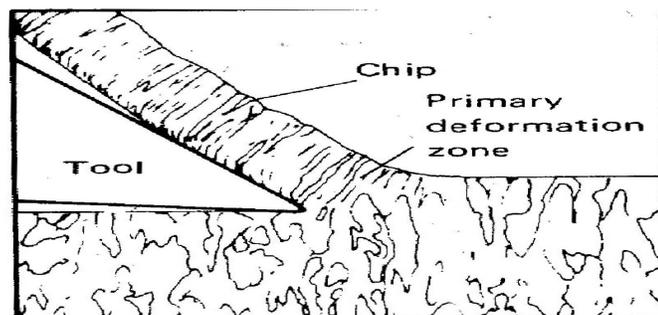
- a. Bidang geram (*A, Face*), adalah bidang tempat geram mengalir.
- b. Bidang utama / mayor (*Aa, Principal Mayor Flank*), adalah bidang yang menghadap permukaan transien dari benda kerja.



Gambar 2.4 Nama bagian mata bor (Kalpakjian and Schmid, 2001)

a. Mekanisme Pembentukan Geram

Proses permesinan yang dilakukan membutuhkan benda kerja dan alat atau perkakas. Pada proses pengeboran pasti akan menghasilkan geram. Sesuai dengan bentuk mata bornya, maka geram yang dihasilkan biasanya berbentuk serpihan panjang spiral. Tetapi ada juga geram yang berupa serpihan kecil. Geram terbentuk karena adanya gesekan antara benda kerja dan mata bor. Bentuk geram itu juga dipengaruhi banyak faktor antara lain kecepatan *spindle* utama, laju pemakanan, jenis material mata bor, suhu pemesinan serta material benda kerja (Hendra, 2005).



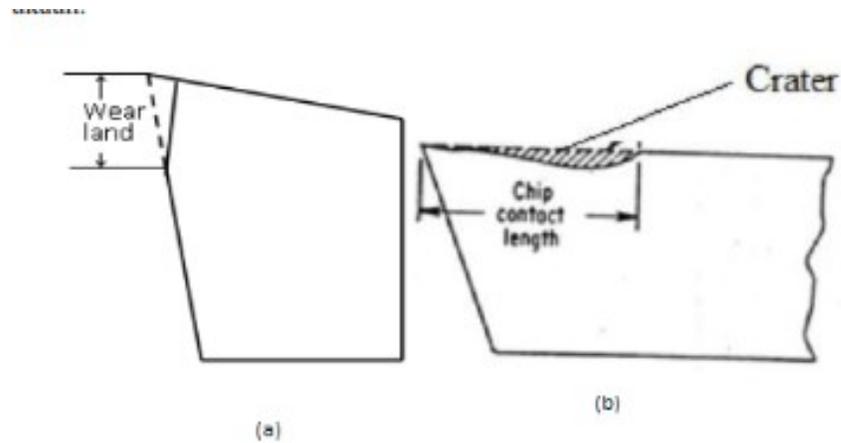
Gambar 2.5 Geram keluar (Kalpakjian and Schmid, 2001)

b. Aus Pahat (*Tool Wear*)

Keausan umumnya didefinisikan sebagai kehilangan material secara progresif atau pemindahan sejumlah material dari suatu permukaan sebagai hasil pergerakan relative antara permukaan tersebut dengan permukaan lainnya. Keausan bukan hanya proses tunggal, tetapi beberapa proses berbeda yang dapat berlangsung independen atau secara bersamaan. Kompleksitas proses keausan dapat dibaca dengan mengetahui berbagai variabel yang terlihat, yaitu kekerasan, ketangguhan, kelenturan, modulus elastis, kekuatan tarik, kelelahan, dan struktur permukaan yang saling bertemu, seperti geometri, suhu, tegangan, distribusi tegangan, koefisien gesek, dan afmosfir dari permukaan yang aus (Abidin, 2010).

Ada dua jenis aus yang umumnya terjadi pada pahat, yaitu aus tepi (*flank wear*) dan aus kawah (*crater wear*). Aus tepi (*flank wear*) bermula dari aksi *abrasive* pada fase kedua pada material atau proses *abrasive* dari ujung pemotongan terhadap permukaan termesin. Aus tepi terjadi pada bidang utama/mayor pahat, seperti terlihat pada gambar 2.6.a (Viktor, 2008). Aus tepi dapat diketahui dengan mengukur panjang VB yaitu jarak antara mata potong sebelum terjadi aus sampai ke garis rata-rata bekas keausan pada bidang utama. Pertumbuhan keausan tepi (*flank wear*) pada umumnya dimulai dengan pertumbuhan yang relatif cepat sesaat pahat digunakan diikuti pertumbuhan yang linier seiring dengan bertambahnya waktu pemotongan dan kemudian pertumbuhan yang cepat terjadi, seperti terlihat pada gambar (2.6). Sementara aus kawah (*crater wear*) diketahui sebagai kombinasi yang kompleks dari berbagai mekanisme keausan

seperti adhesi, abrasi dissolusi dan difusi.. Aus kawah terjadi pada bidang geram pahat, seperti terlihat pada gambar 2.6.b (Viktor, 2008).



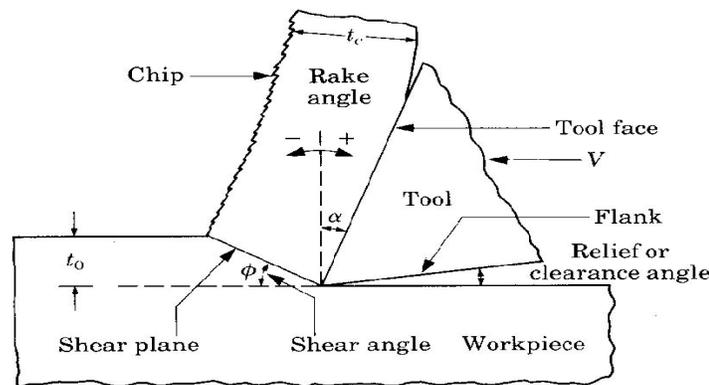
Gambar 2.6. (a) *Flank wear*, (b) *Crater wear* (Viktor, 2008).

Aus kawah dapat diukur dengan alat ukur kekasaran permukaan. Besarnya aus sisi/tepi serta pengukurannya ditentukan sesuai standar ISO 3685-1977(E), rata-rata keausan tepi pahat mencapai ($VB = 0,2$ mm dan maksimum $0,6$ mm) gambar (2.6). Aus sisi dapat diukur dengan menggunakan mikroskop, dimana bidang mata potong diatur sehingga tegak lurus sumbu optik.

c. Kriteria Aus Mata Bor

Keausan mata bor akan tumbuh dengan bertambahnya waktu pemotongan sampai pada suatu saat pahat yang bersangkutan dianggap tidak dapat digunakan lagi karena telah ada tanda-tanda tertentu yang menunjukkan bahwa umur pahat telah habis. Semakin besar keausan yang dialami mata bor maka kondisi mata bor akan semakin kritis. Jika pahat bor tersebut

masih tetap digunakan maka pertumbuhan keausan akan semakin cepat dan pada suatu saat ujung pahat akan sama sekali rusak. Kerusakan fatal seperti ini tidak boleh terjadi sebab gaya pengeboran akan sangat tinggi sehingga dapat merusak seluruh mata bor, mesin perkakas dan benda kerja, serta dapat membahayakan operator yang menggunakan mesin tersebut. Oleh sebab itu, untuk menghindari hal tersebut ditetapkan suatu batas harga keausan yang dianggap sebagai batas kritis seperti terlihat pada Tabel 2.3, dimana mata bor sudah tidak dapat digunakan. Menurut Makmur (2010), dalam buku yang berjudul proses pemesinan, batas keausan kritis dapat dilihat pada Tabel 2.3 dibawah ini :



Gambar 2.7 Bidang pahat potong (flank, rake, clearance...)
(Kalpakjian and Schmid, 2001)

Tabel 2.3 Batas Keausan Kritis

Mata Bor	Benda Kerja	VB	K
HSS	Baja dan Besi Tuang	0,2 s.d 0,8	-
Karbida	Baja	0,2 s.d 0,6	0,3
Karbida	Besi Tuang dan Non Ferous	0,4 s.d 0,6	0,3
Keramik	Baja dan Besi Tuang	0,3	

Sumber : (Rochim, T, 2007)

Dimana:

$$VB = \text{Harga keausan tepi}$$

$$K = \text{Rasio kawah (crater wear)} = KT/KM$$

Seperti terlihat pada Tabel 2.3, untuk masing-masing mata bor dengan benda kerja tertentu nilai batas kritis keausannya akan berbeda. Salah satu contoh adalah untuk mata bor karbida dengan benda kerja baja, mempunyai nilai batas keausan kritis 0,2 mm – 0,6 mm. Berbeda dengan mata bor karbida dengan benda kerja besi tuang yang mempunyai nilai batas keausan kritis yaitu 0,4 mm - 0,6 mm. Apabila keausan mata bor telah mencapai nilai batas keausan kritis tersebut maka mata bor harus diganti atau diasah kembali (Rochim, 1993)

d. **Pengamatan Aus Pahat**

Metode pengamatan aus dan kegagalan pahat dapat dilakukan dengan dua kategori yaitu pengamatan langsung dan pengamatan tidak langsung (Kalpakjian, 2002).

a. Pengamatan langsung

Pengamatan langsung adalah pengamatan pengukuran secara optik/mikroskopik terhadap kondisi aus pahat potong yang dilakukan secara periodik dalam bentuk pengikisan sisi serta kawah pahat dan suhu pemotongan yang berkaitan dengan perubahan profil pahat. Cara ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop atau SEM. Prosedur dengan cara ini dilakukan pada kondisi pemotongan yang dihentikan pada interval waktu tertentu guna dilakukan pengamatan profil kerusakan pahat secara periodik (Kalpakjian, 2002).

b. Pengamatan tidak langsung

Pengamatan tidak langsung adalah pengukuran aus pahat yang dipengaruhi oleh korelasi antara kondisi pahat dengan variabel gaya potong, daya, panas yang terjadi dan getaran dan bukan akibat abrasif dan suhu pemotongan (Kalpakjian, 2002). Metode ini menggunakan teknik emisi akustik (*acoustic emission technique*).

2.6. Bahan Pahat

a. Material mata bor

Proses pembentukan geram dengan cara pemesinan berlangsung, dengan cara mempertemukan dua jenis material. Untuk menjamin kelangsungan proses ini maka jelas di perlukan material pahat dan mata bor yang lebih unggul daripada material benda kerja. Keunggulan tersebut dapat di capai karena pahat dan mata bor di buat dengan memperhatikan berbagai segi yaitu :

- 1) Kekerasan yang cukup tinggi melebihi kekerasan benda kerja tidak saja pada suhu ruang melainkan juga pada suhu tinggi pada saat proses pembentukan geram berlangsung.
- 2) Keuletan yang cukup besar untuk menahan beban kejut yang terjadi sewaktu pemesinan dengan interupsi maupun sewaktu benda kerja memotong yang mengandung partikel atau bagian yang keras (*hard spot*).
- 3) Tahan beban kejut termal: ketahanan ini diperlukan bila terjadi perubahan suhu yang cukup besar secara berkala atau periodik.

- 4) Sifat adhesi yang rendah diperlukan untuk mengurangi avinitas benda kerja terhadap pahat, mengurangi laju keausan, serta penurunan gaya pemotongan.
- 5) Daya larut yang rendah di butuhkan untuk memperkecil laju keausan akibat mekanisme difusi.
- 6) Rendah penyerapan (solubility) pahat terhadap unsur benda kerja untuk mencegah aus pahat (Schey, 2000).
- 7) Kemampuan kesetimbangan secara kimia terhadap pengaruh benda kerja (Kalpakjian, 2002).

b. Pahat Bor HSS

Pada suatu proses pemesinan dengan pekerjaan pemesinan tertentu diperlukan pahat bor dari jenis material yang cocok. Keterbatasan kemampuan suatu jenis material pahat perlu diperhitungkan. Berikut adalah pahat yang sering digunakan menurut urutannya mulai dari material yang relatif lunak sampai dengan yang paling keras sebagai berikut :

- 1) Baja Karbon Tinggi (High Carbon Steel, Carbon Tool Steels, CTS)
- 2) HSS (High Speed Steels, Tool Steels)
- 3) Paduan Cor Non logam (Cast Nonferrous Alloys, Cast Carbides)
- 4) Karbida (Cermeted Carbides, Hardmetals)
- 5) Keramik (*Ceramic*)
- 6) CBN (*Cubic Boron Nitride*)
- 7) Intan (*Sintered Diamons & Natural Diamonds*)

Pada tahun 1900 FW.Taylor dan Maunsel White menemukan HSS (*High Speed Steel*) atau baja kecepatan tinggi. Amstead (1977) menyempurnakan HSS dengan menambahkan tungsten 18% dan chromium 5,5% ke dalam baja paduan. Komposisi HSS biasanya terdiri dari paduan besi dengan karbon, tungsten, molybdenum, chromium dan vanadium bahkan kadang-kadang ada tambahan cobalt (ASM International Vol. 16, 1997).

Mata bor *High Speed Steels* (HSS) merupakan paduan dari 0,75%-1,5% Carbon(C), 4%-4,5% Chromium (Cr), 10%-20% Tungsten (W) dan Molybdenum (Mo), 5% lebih Vanadium (V), dan Cobalt (Co) lebih dari 12% (Childs, dkk, 2000). Pahat bor HSS dapat digolongkan menjadi tiga kelompok yaitu *high speed steel*, *molybdenum high speed steel*, dan *super high speed steel*. Peningkatan kekerasan permukaan HSS dan ketahanan aus dapat dilakukan dengan pelapisan. Beberapa material pelapis di antaranya; tungsten karbida, titanium karbida, dan titanium nitrida, dengan tebal pelapisan 5-8 μm (Boothroyd, 1975). Peningkatan kekerasan HSS dapat dilakukan dengan di-quenching, kekerasannya 52-63 HRC. Untuk HSS yang dipanaskan pada suhu 1175-1230oC dan di-quenching dengan oli, kemudian di-temper pada suhu 550-580oC, kekerasannya meningkat sampai 63-65 HRC (Leslie,1983).

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 (Ra) 0,025 μm dan nilai yang paling tinggi adalah N12 dengan nilai kekasarannya 50 μm (Azhar, 2014).

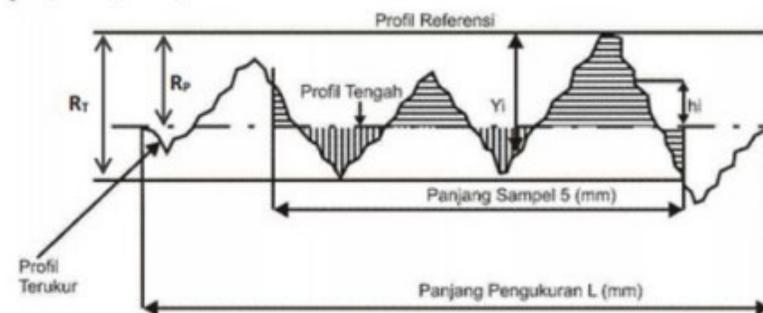
Tingkat kehalusan suatu permukaan memang peranan yang sangat penting dalam perencanaan suatu komponen mesin khususnya yang menyangkut masalah gesekan pelumasan, keausan, tahanan terhadap kelelahan dan sebagainya. Oleh karena itu, dalam perencanaan dan pembuatannya harus dipertimbangkan terlebih dulu mengenai peralatan mesin yang mana harus digunakan untuk membuatnya serta berapa ongkos yang harus dikeluarkan.

Agar proses pembuatannya tidak terjadi penyimpangan yang berarti maka karakteristik permukaan ini harus dapat dipahami oleh perencana lebih-lebih lagi oleh operator. Komunikasi karakteristik permukaan biasanya dilakukan dalam gambar teknik. Akan tetapi untuk menjelaskan secara sempurna mengenai karakteristik suatu permukaan nampaknya sulit.

Permukaan adalah batas yang memisahkan antara benda padat dengan sekelilingnya. Jika ditinjau skala kecil pada dasarnya konfigurasi permukaan merupakan suatu karakteristik geometri golongan mikro geometri, yang termasuk golongan makrogeometri adalah merupakan permukaan secara keseluruhan yang membuat bentuk atau rupa yang spesifik, misalnya permukaan lubang, permukaan poros, permukaan sisi dan lain-lain yang tercakup pada elemen geometri ukuran, bentuk dan posisi (Chang Xue, 2002).

Kekasaran permukaan dibedakan menjadi dua bentuk, di antaranya :

1. Ideal Surface Roughness, yaitu : kekasaran ideal yang dapat dicapai dalam suatu proses permesinan dengan kondisi ideal.
2. Natural Surface Roughness, yaitu : kekasaran alamiah yang terbentuk dalam proses permesinan karena adanya beberapa faktor yang mempengaruhi proses permesinan diantaranya :
 - a. Keahlian operator.
 - b. Getaran yang terjadi pada mesin.
 - c. Ketidakteraturan feed mekanisme.
 - d. Adanya cacat pada material.



Gambar 2.8 Profil suatu permukaan (Munadi, 1988)

Profil kekasaran permukaan terdiri dari :

- a. Profil geometrik ideal

Merupakan permukaan yang sempurna dapat berupa garis lurus, lengkung atau busur.

b. Profil terukur (*measured* profil)

Profil terukur merupakan profil permukaan terukur.

c. Profil referensi

Merupakan profil yang digunakan sebagai acuan untuk menganalisa ketidakteraturan konfigurasi permukaan.

d. Profil akar / alas

Yaitu profil referensi yang digeserkan ke bawah sehingga menyinggung titik terendah profil terukur.

e. Profil tengah

Profil tengah adalah profil yang digeserkan ke bawah sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagi daerah-daerah diatas profil tengah sampai profil terukur adalah sama dengan jumlah luas daerah-daerah di bawah profil tengah sampai ke profil terukur.

Berdasarkan profil Gambar 2.8 di atas, dapat didefinisikan beberapa parameter permukaan, yaitu yang berhubungan dengan dimensi pada arah tegak dan arah memanjang. Untuk dimensi arah tegak dikenal beberapa parameter, yaitu :

1. Kekasaran total (*peak to valley height/total height*), R_t (μm) adalah jarak antara profil referensi dengan profil alas.
2. Kekasaran perataan (*depth of surface smoothness/peak to mean line*), R_p (μm) adalah jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur.
3. Kekasaran rata-rata aritmetik (*mean roughness index/center line average, CLA*). R_a (μm) adalah harga rata-rata aritmetik dibagi harga absolutnya jarak antara profil terukur dengan profil tengah.

$$Ra = 1 / \int hi^2 dx 10 ; (\mu m) \dots \dots \dots (2.1)$$

4. Kekasaran rata-rata kuadrat (root mean square height), Rq (μm) adalah

akar bagi jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.

$$Ra = \sqrt{1 / \int hi^2 dx 10} ; (\mu m) \dots \dots \dots (2.2)$$

5. Kekasaran total rata-rata, Rz (μm) merupakan jarak rata-rata profil alas ke profil terukur pada lima puncak tertinggi dikurangi jarak rata-rata profil alas ke profil terukur pada lima lembah terendah.

$$Rz = \Sigma [R1 + R2 + \dots R5 - R6 \dots R10] ; (\mu m) \dots \dots \dots (2.3)$$

Penentuan dan Teknik pengukuran dilakukan dengan metode sentuh (penggunaan alat pengukur sentuh) yang dimana hal ini bekerja secara elektrik serta menghasilkan profilograin dari sebuah permukaan dan banyak macam besaran kekasaran permukaan seperti Ra,Rt,Rz,Rmax dan sebagainya secara langsung.

Parameter kekasaran yang biasa dipakai dalam proses produksi untuk mengukur kekasaran permukaan benda adalah kekasaran rata-rata (Ra). Harga Ra lebih sensitif terhadap perubahan atau penyimpangan yang terjadi pada proses pemesinan. Toleransi harga Ra, seperti halnya toleransi ukuran (lubang dan poros) harga kekasaran rata-rata aritmetis Ra juga mempunyai harga toleransi kekasaran. Harga toleransi kekasaran Ra ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Toleransi harga kekasaran rata-rata Ra

Kelas kekasaran	Harga C.L.A (μm)	Harga Ra (μm)	Toleransi $N_{+20\%}^{-20\%}$	Panjang sampel (mm)
N1	1	0.0025	0.02 – 0.04	0.08
N2	2	0.05	0.04 – 0.08	
N3	4	0.0	0.08 – 0.15	
N4	8	0.2	0.15 – 0.3	0.25
N5	16	0.4	0.3 – 0.6	
N6	32	0.8	0.6 – 1.2	
N7	63	1.6	1.2 – 2.4	0.8
N8	125	3.2	2.4 – 4.8	
N9	250	6.3	4.8 – 9.6	
N10	500	12.5	9.6 – 18.75	2.5
N11	1000	25.0	18.75 – 37.5	
N12	2000	50.0	37.5 – 75.0	
				8

Sumber : Saputro *et al*, (2014)

Toleransi harga kekasaran rata-rata, Ra dari suatu permukaan tergantung pada proses pengerjaannya. Hasil penyelesaian permukaan dengan menggunakan mesin gerinda sudah tentu lebih halus dari pada dengan menggunakan mesin bubut. Tabel 2.5 berikut ini memberikan contoh harga kelas kekasaran rata-rata menurut proses pengerjaannya.

Tabel 2.5. Tingkat kekasaran rata-rata permukaan menurut proses pengerjaannya

Proses pengerjaan	Selang (N)	Harga R_a
<i>Flat and cylindrical lapping,</i>	$N_1 - N_4$	0.025 – 0.2
<i>Superfinishing Diamond turning</i>	$N_1 - N_6$	0.025 – 0.8
<i>Flat cylindrical grinding</i>	$N_1 - N_8$	0.025 – 3.2
<i>Finishing</i>	$N_4 - N_8$	0.1 – 3.2
<i>Face and cylindrical turning, milling and reaming</i>	$N_5 - N_{12}$	0.4 – 50.0
<i>Drilling</i>	$N_7 - N_{10}$	1.6 – 12.5
<i>Shapping, planing, horizontal milling</i>	$N_6 - N_{12}$	0.8 – 50.0
<i>Sandcasting and forging</i>	$N_{10} - N_{11}$	12.5 – 25.0
<i>Extruding, cold rolling, drawing</i>	$N_6 - N_8$	0.8 – 3.2
<i>Die casting</i>	$N_6 - N_7$	0.8 – 1.6

Sumber : Saputro *et al*, (2014)

2.8. Perhitungan Waktu Pemotongan Benda Kerja

Parameter proses pengeboran pada dasarnya sama dengan parameter proses pemesinan yang lain, akan tetapi dalam proses pengeboran selain kecepatan bor, gerak makan, dan dan kedalaman pengeboran perlu dipertimbangkan juga gaya aksial, dan momen puntir yang diperlukan pada proses bor. Parameter proses bor tersebut adalah gaya aksial dan momen puntir yang diperlukan pada proses gurdi. Parameter proses bor tersebut adalah :

1. Kecepatan Potong Pengeboran

Kecepatan potong ditentukan dalam satuan panjang yang dihitung berdasarkan putaran mesin per menit. Atau secara definitif dapat dikatakan bahwa kecepatan potong adalah panjangnya geram yang terpotong per satuan waktu.

Setiap jenis logam mempunyai harga kecepatan potong tertentu dan berbeda-beda. Dalam pengeboran putaran mesin perlu disesuaikan dengan kecepatan potong logam. Bila kecepatan potongnya tidak tepat, mata bor cepat panas dan akibatnya mata bor cepat tumpul atau bisa patah. Untuk mendapatkan putaran mesin bor per menit ditentukan berdasarkan keliling mata bor dalam satuan panjang (mm). Kemudian kecepatan potong dalam meter per menit dirubah menjadi milimeter per menit dengan perkalian 1000. Akhirnya akan diperoleh kecepatan potong pengeboran dalam harga m/menit.

Kecepatan potong :

$$v = \frac{\pi d n}{1000} \text{ m/menit} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

d = diameter benda kerja (mm)

v = kecepatan potong (m/menit)

n = putaran *spindle* (rpm)

π = konstanta : 3,14

Berdasarkan perhitungan diatas, maka didapat nilai kecepatan mata bor yang direkomendasikan untuk mata bor HSS.

Tabel 2.6 Nilai kecepatan mata potong bor dari bahan HSS

Kecepatan Potong yang dianjurkan untuk Pahat HSS						
Material	Pembubutan dan Pengeboran					
	Pemotongan Kasar		Pemotongan Akhir		Penguliran	
	m/menit	ft/ menit	m/ menit	ft/ menit	m/ menit	ft/ menit
Baja Mesin	27	90	30	100	11	33
Baja Perkakas	21	70	27	90	9	30
Besi Tuang	18	60	24	80	8	25
Perunggu	27	90	30	100	8	25
Aluminium	27	90	30	100	11	35

Sumber : Hendra, 2005

Tabel 2.7 Nilai kecepatan potong mata bor dari bahan HSS

Bahan	Kecepatan Potong (m / menit)
1. Aluminium Campuran	1. 60 – 100
2. Kuningan Campuran	2. 30 – 100
3. Perunggu Tegangan Tinggi	3. 25 – 30
4. Besi Tuang Lunak	4. 30 – 50
5. Besi Tuang Menengah	5. 25 – 30
6. Besi Tuang Keras	6. 10 – 20
7. Tembaga	7. 20 – 30
8. Baja Karbon Rendah	8. 30 – 50
9. Baja Karbon Sedang	9. 20 – 30
10. Baja karbon Tinggi	10. 15 – 20
11. Baja Perkakas	11. 10 – 30
12. Baja Campuran	12. 15 – 25

Sumber : Hendra, 2005

2. Pemakanan Pengeboran

Pemakanan adalah jarak perpindahan mata potong bor ke dalam lobang/benda kerja dalam satu kali putaran mata bor. Besarnya pemakanan dalam pengeboran dipilih berdasarkan jarak pergeseran mata bor dalam satu putaran, sesuai dengan yang diinginkan. Pemakanan juga tergantung pada bahan yang akan dibor, kualitas lubang yang dibuat, kekuatan mesin yang ditentukan berdasarkan diameter mata bor.

Tabel 2.8 Besarnya pemakanan berdasarkan diameter mata bor

Diameter Mata Bor (mm)	Besarnya Pemakanan Satu Kali Putaran (mm/rev)
1. <3	1. 0,025 – 0,050
2. 3 – 6	2. 0,050 – 0,100
3. 6 – 12	3. 0,100 – 0,175
4. 12 – 15	4. 0,175 – 0,375
5. 25 – dan seterusnya	5. 0,375 – 0,675

Sumber : Hendra, 2005

3. Waktu pemotongan

$$t_c = \frac{t_t}{v_f} : \text{menit} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

t_c = waktu pemotongan (menit)

t_t = panjang pemotongan benda kerja (mm)

v_f = kecepatan pemakan (mm/menit)

4. Kecepatan penghasilan geram (*rate of metal removal*) : Z (cm³/min)

Elemen proses pemotongan tersebut dihitung berdasarkan dimensi benda kerja atau pahat serta besaran dari mesin perkakas. Oleh sebab itu rumus yang dipakai untuk menghitung setiap elemen proses pemesinan dapat

berbeda. Pada setiap proses diperkenalkan dua sudut pahat yang penting yaitu sudut potong utama (*principal cutting edge angle*) dan sudut geram (*rake angle*). Kedua sudut tersebut berpengaruh antara lain pada penampang geram, gaya pemotongan serta umur pahat bor.

$$Z = \frac{\pi d^2}{4} \frac{V_f}{1000} ; \text{cm}^3/\text{menit} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

Z = kecepatan penghasiian geram (cm^3/menit)

d = diameter benda kerja (mm)

π = konstanta 3,14

V_f = kecepatan pemakan (mm/menit)

2.9. Pengukuran Daya Mesin Perkakas

Dalam proses manufaktur, Energi diubah menjadi kerja berguna. Kerja berguna tersebut dibagi menjadi banyak tahap, dimana tiap tahapnya mengkonsumsi banyak energi. Energi tersebut dibagi berdasarkan dua faktor yaitu daya yang dikonsumsi mesin dan waktu yang dibutuhkan mesin dalam menyelesaikan tahapan proses. Mesin bergantung pada listrik untuk menerima daya tersebut. Daya dapat dikarakteristikan dengan perkalian dua variabel yaitu tegangan (*Voltage*) dan suplai arus listrik (*Current*).

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Gonzalez (2007), metodologi yang diaplikasikan sebagian besar dilakukan untuk mengukur daya yang dikonsumsi tiap tahapan proses. Untuk hasil yang akurat percobaan pengukuran diperlukan. Kordonowy (2002), menyarankan untuk pengukuran konsumsi daya dilakukan dalam kondisi pemotongan yang berbeda.

Pengukuran pertama kali dilakukan saat mesin dihidupkan (start-up) dengan menghidupkan unit komputer dan kipas (computer and fans). Kemudian pengukuran berikutnya dilakukan ketika motor servo menggerakkan pengapit selanjutnya motor *spindle*. Setelah itu pengukuran dilakukan saat kondisi operasi (*runtime*) (menggerakkan poros x/y/z, mengganti pahat potong, serta pengapit pahat yang berputar/carousel). Terakhir, pengukuran daya dilakukan ketika proses pemesinan pada nilai *MRR (material removal rates)* yang berbeda. Secara singkat untuk analisis energi yang akurat, informasi konsumsi daya dari masing masing proses yang melibatkan sistem penggerak serta komponen tambahan pada mesin perkakas perlu dikumpulkan. Ketika konsumsi energi tiap tahapan proses diketahui, analisis untuk mengestimasi konsumsi daya keseluruhan dapat ditentukan. Dengan menggunakan persamaan (2.7) perhitungan estimasi biaya dapat diketahui dengan cara mengalikan konsumsi energi keseluruhan (kWh) dengan biaya energi per jam (Kordonowy, 2002).

$$\text{Energy Cost} = \text{Overall Power Consumption kWh} \cdot \frac{\text{Cost}}{\text{kWh}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Untuk mengukur konsumsi daya dari mesin perkakas pertama-tama perlu diketahui bagaimana daya mengalir melalui mesin. Setelah mengetahui aliran daya pada mesin perkakas maka selanjutnya adalah melakukan prosedur pengukuran. Secara fisik untuk mengukur Tegangan dan arus yang mengalir pada mesin perlu digunakan peralatan yang dapat mengukur konsumsi keduanya. Peralatan yang digunakan untuk pengukuran tegangan dan arus antara lain yaitu (Kordonowy, 2002) :

1. Multimeter

Multimeter merupakan alat ukur kelistrikan dengan tiga mode operasi pengukuran yaitu pengukuran tegangan sebagai Voltmeter, Arus sebagai Ammeter, atau resistansi sebagai Ohmmeter. Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan satu kabel ke multimeter. Hal tersebut dilakukan dengan membuat gap dalam satu kabel dengan melepas kabel dan menghubungkannya ke multimeter.



Gambar 2.9 Multimeter Digital (Rochim, 2007)

2. *Clamp-On Multimeter*

Clamp-On Multimeter digunakan untuk mengukur arus dan tegangan pada kabel dengan baik. Tidak seperti multimeter, *Clamp-On Multimeter* dapat mengukur kabel yang dialiri tegangan dan arus secara langsung tanpa menyentuh kabel, sehingga minim kemungkinan terjadi arus pendek atau tersengat listrik. *Clamp-On Multimeter* jauh lebih aman jika dibandingkan dengan Multimeter Standar. *Clamp-On Multimeter* dapat menghitung besar tegangan dan juga arus listrik yang dibutuhkan pada saat proses pembubutan, sehingga dapat ditentukan daya potong total yang terpakai dalam proses pembentukan geram, dengan persamaan berikut ini:

$$N_{ct} = \frac{I \cdot V}{1000} \text{ (kW)} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana,

I = kuat arus listrik (*ampere*)

Dari pengukuran *tang ampere*

V = tegangan listrik (*volt*)

Untuk konsumsi Perusahaan Listrik Negara, 220 volt.



Gambar 2.10 Digital *Clamp-On Multimeter* (Rochim, 2007)

Daya pemotongan dalam proses pembentukan geram ditentukan oleh gaya pemotongan dengan kecepatan pemotongan (kecepatan pahat relatif terhadap benda kerja), dengan demikian gaya pemotongan dapat ditentukan dengan persamaan: (Rochim, 2007)

$$N_{\text{et}} = \frac{F_p \cdot v}{60.000} \text{ (kW)} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$F_p = \frac{N_{\text{et}} \cdot (60.000)}{v} \text{ (N)} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.10. *Dry Machining* (Pemesinan Kering)

Pemesinan kering (*Dry Machining*) adalah proses pemesinan yang tidak menggunakan fluida pendingin dalam proses pemotongannya. Fenomena kegagalan pahat dan penggunaan cairan pemotongan merupakan salah satu masalah yang telah banyak dikaji dan mendapat perhatian. Hal ini dalam kaitannya yang sangat berpengaruh terhadap kekasaran permukaan hasil pengerjaan, ketelitian geometri produk dan mekanisme keausan pahat serta

umur pahat. Beberapa informasi melaporkan bahwa umumnya cairan pemotongan bekas disimpan dalam kontainer dan kemudian ditimbun di tanah. Selain itu, masih banyak praktek yang membuang cairan pemotongan bekas langsung ke alam bebas. Hal ini jelas akan merusak lingkungan. Pilihan alternatif dari pemesinan basah adalah pemesinan kering, karena selain tidak ada cairan pemotongan bekas dalam jumlah besar yang akan mencemari lingkungan juga tidak ada kabut partikel cairan pemotongan yang akan membahayakan operator dan juga serpihan pemotongan tidak terkontaminasi oleh residu cairan pemotongan. Pemesinan kering mempunyai beberapa masalah yang antara lain, gesekan antara permukaan benda kerja dan pahat potong, kecepatan keluar serpihan, serta suhu potong yang tinggi dan hal tersebut semuanya terkait dengan parameter pemesinan. Secara umum industri pemesinan pemotongan logam melakukan pemesinan kering adalah untuk menghindari pengaruh buruk akibat cairan pemotongan yang dihasilkan oleh pemesinan basah. Argumen ini secara khusus didukung oleh penelitian yang telah dilakukan Mukun *et. al.*, (1995) secara kuantitatif menyangkut pengaruh buruk pemesinan basah dengan anggapan pada pemesinan kering tidak akan dihasilkan pencemaran lingkungan kerja dan ini berarti tidak menghasilkan kabut partikel cairan pemotongan. Oleh sebab itu perlu diketahui pentingnya pemesinan kering dilakukan dalam proses industri. Pakar pemesinan mencoba mencari solusi dengan suatu metode pemotongan alternatif dan mereka merumuskan bahwa pemesinan kering (*dry cutting*) yang dari sudut pandang ekologi disebut dengan

pemesinan hijau (*green machining*) merupakan jalan keluar dari masalah tersebut. Melalui pemesinan kering diharapkan disamping aman bagi lingkungan, juga bisa mereduksi ongkos produksi. Pemesinan kering direkomendasikan penggunaannya untuk mengatasi masalah pencemaran lingkungan akibat limbah cairan pendingin, maka para pakar pemesinan merekomendasikan dengan pemesinan kering. Selain karena alasan masalah pencemaran lingkungan hal lain yang menjadi alasan dipakainya metode pemesinan kering adalah untuk menghemat biaya produksi. Mengingat persaingan dalam dunia manufaktur begitu ketat maka penelitian terhadap teknologi pemesinan hijau (*green machining*) terus dilakukan. Hal ini dikarenakan walaupun teknologi pemesinan hijau (*green machining*) terus berkembang akan tetapi teknologi yang ada sekarang ini hanya mampu digunakan untuk proses dengan pemakanan yang kecil, sehingga hanya dipakai untuk proses penghalusan (*finishing*) (Sreejith, 2000).

Pemesinan kering diakui mampu mengatasi masalah pada dampak yang telah diuraikan di atas. Pilihan alternatif dari pemesinan basah adalah pemesinan kering, karena selain tidak ada cairan pemotongan bekas dalam jumlah besar yang akan mencemari lingkungan juga tidak ada kabut partikel cairan pemotongan yang akan membahayakan operator dan juga serpihan pemotongan tidak terkontaminasi oleh residu cairan pemotongan. Pemesinan kering mempunyai beberapa masalah yang antara lain, gesekan antara permukaan bendakerja dan pahat potong, kecepatan keluar geram, serta suhu potong yang tinggi dan hal tersebut semuanya terkait dengan

parameter pemesinan. Dimana pada pengembangan bersih teknologi produksi sebagai pemesinan kering atau menggunakan Minimum Pelumasan Kuantitas, MQL (Viletta, M., dkk, 2012, Rubio, E. M., 2014). Konsep pemesinan kering ini sebenarnya biasa dilakukan oleh industri manufaktur. Dari aspek proses pemesinan, pemesinan kering berarti pemotongan logam dilakukan pada suhu dan gesekan yang relatif tinggi. Sejak akhir tahun 1970 penggunaan proses pembubutan keras (*hard turning*) dijadikan inovasi berikutnya untuk mengatasi permasalahan yang ada, hal ini terbukti melalui proses pembubutan keras dapat mereduksi waktu pemesinan hingga 60 % (Thonsoff, dkk, 1995).

2.11. Metode Taguchi

Metode Taguchi dikembangkan oleh Dr. Genichi Taguchi. Metode ini berisi tiga stages , disain system, disain parameter, dan disain toleransi. Metode Taguchi adalah sebuah metode statistik yang digunakan untuk meningkatkan kualitas produk. Menurut Bagchi (2013) pada umumnya metode taguchi merupakan metode yang berfokus pada peningkatan desain proses manufaktur dan produk. Lebih lanjut pada metode taguchi, perancangan eksperimen dilakukan secara *offline* (perancangan secara tidak langsung meliputi perancangan konsep, parameter dan toleransi) yang dilakukan sebelum proses produksi dimulai yang untuk meningkatkan kemampuan proses. Metode taguchi bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dengan menekankan pentingnya perencanaan pada produk yang kokoh (*robust*) sehingga rancangan produk dan proses dapat berfungsi

dengan baik. Proses Taguchi membantu pemilihan dan penentuan kondisi potong optimal untuk proses pengeboran. Taguchi mengembangkan sebuah desain khusus dari orthogonal array untuk mempelajari seluruh ruang parameter dengan hanya menggunakan sejumlah kecil percobaan. Hasil percobaan ditransformasikan kedalam rasio *Signal-to Ratio* (S/N). Kemudian dengan menggunakan rasio S/N sebagai pengukur penyimpangan sifat kualitas dari pendekatan ke nilai yang diharapkan. Ada tiga kategori dari sifat kualitas dalam analisa dari rasio S/N, misalnya yang lebih rendah yang lebih baik, yang lebih tinggi yang lebih baik, dan yang nominal yang lebih baik. Rumus yang digunakan untuk menghitung rasio S/N diberikan dibawah. Yang lebih kecil lebih baik. Hal ini digunakan ketika nilai yang lebih kecil yang diharapkan.

$$\text{Rasio S/N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n y_i^2 \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana y = nilai tanggapan yang diobservasi dan n = angka pengulangan
Yang paling baik yang nominal. Ini digunakan dimana nilai nominal atau target yang nilainya adalah minimum.

$$\text{Rasio S/N} = -10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana μ = mean dan σ = variance

Lebih tinggi lebih baik. Ini digunakan dimana nilai yang lebih besar adalah yang diharapkan.

$$\text{Rasio S/N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \dots\dots\dots(2.13)$$

Taguchi menyatakan suatu prosedur atandar untuk mengoptimalkan parameter – parameter proses.

2.12. ANOVA (*Analysis of Variance*)

ANOVA adalah teknik statistik untuk menentukan derajat perbedaan atau persamaan antara dua atau lebih kelompok data. Berdasar pada perbandingan nilai rata-rata dari sebuah komponen biasa. Pareto ANOVA digunakan untuk mengukur pentingnya parameter proses untuk proses – proses. Analisis varians adalah teknik perhitungan yang memungkinkan secara kuantitatif memperkirakan kontribusi dari setiap faktor pada semua pengukuran respon. Analisis varian yang digunakan pada desain parameter berguna untuk mengidentifikasi kontribusi faktor, sehingga akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Metode Taguchi mengembangkan konsep S/N (rasio Signal-to-Noise) untuk eksperimen yang melibatkan banyak faktor. Rasio S/N diformulasikan sedemikian sehingga selalu dapat dipilih nilai level faktor terbesar dan mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Dengan perhitungan rasio S/N tersebut akan menghasilkan karakteristik kualitas, apakah responnya semakin kecil semakin baik, semakin besar semakin baik atau pula tertuju pada nilai tertentu.

2.13. *Grey Relational Analysis (GRA)*

Metode Taguchi biasanya hanya dapat digunakan untuk mengoptimasi satu respon saja. Untuk optimasi beberapa respon dengan Metode Taguchi

dapat digunakan pendekatan dengan Grey Relational Analysis (GRA). Teori GRA ditemukan oleh Deng pada periode 1980-an. Pada dasarnya Metode GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon saja. Teori ini berhubungan dengan metode Taguchi yang menunjukkan sebuah pendekatan optimasi yang lebih baru. Pada awalnya, teori GRA mengadopsi teori Grey yang sudah lama ditemukan sebelumnya. Teori Grey berasal dari hasil pencampuran antara informasi yang jelas dan tidak jelas. Misalnya, hitam dilambangkan sebagai informasi yang tidak jelas, yang bisa diartikan sebagai informasi yang belum sempurna. Sedangkan putih sebaliknya dilambangkan informasi yang benar-benar jelas. Tetapi suatu saat informasi bisa berada diantara perpaduan hitam dan putih yang dikenal dengan abu-abu, informasi yang mempunyai beberapa hal yang jelas dan tidak jelas atau kurang sempurna (Wulandari, 2016).

Proses Grey Relational Analysis sendiri merupakan pendekatan kuantitatif dan sistematis, yang merupakan subsistem dari Grey System Theory dan digunakan secara luas untuk menyelesaikan suatu sistem yang rumit. GRA dapat digunakan dalam bidang finansial, logistik dan juga proses optimasi. GRA dapat digunakan secara efektif untuk masalah-masalah multiple kriteria dan hubungan rumit yang terjadi diantara masing-masing kriteria, serta dapat digunakan untuk optimasi proses parameter yang dipengaruhi 2 atau lebih respon variabel (Patil *et al.*, 2019).

Grey Relational Analysis (GRA) adalah sebuah alat optimasi yang sangat baik untuk mengatasi masalah hubungan yang kompleks antara multi

objek pada berbagai bidang manufaktur. GRA menggunakan harga *Grey Relation Generation* untuk menghitung *Grey Relation Coefficient*, untuk memperhitungkan permasalahan sistem yang kompleks dengan informasi yang diketahui bersifat tidak pasti dan sebagian. Harga *Grey Relation Grade* (GRG) ditemukan dengan merata-rata harga *Grey Relation Coefficient* pada respon masing-masing untuk mengkonversi multi respon karakteristik kedalam harga respon tunggal GRG. Level dari parameter dengan harga *Grey Relation Grade* tertinggi adalah level optimum untuk proses optimasi multi objektif pada percobaan. Langkah awal pada analisa GRA yaitu menormalisasi data yang dikenal sebagai *Grey Relational Generation* (data *pre-processing*). Tiap respon yang diamati dalam eksperimen dinormalisasi kedalam rentang harga 0-1 (0 untuk harga minimum respon, dan 1 harga maksimum), untuk mendapatkan nilai sekuensi yang mampu dibandingkan, karna sebelumnya harga tiap respon berbeda dimensi dan jangkauannya. Untuk menormalisasi data tersebut digunakan formulasi yang ada pada halaman selanjutnya.

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana :

$X_i^*(j)$ = 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

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 :

$$\Delta 0(j) = | X_0^*(j) - X_i^*(j) | \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana : $X_0^*(j) = 1$ (nilai terbesar normalisasi S/N Ratio diinversikan sebesar 1).

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

$$\zeta_i^*(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \Delta_{max}} \dots\dots\dots (2.16)$$

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

Setelah didapatkan harga Grey Relational Coefficient (GRC), kemudian dilanjutkan proses menghitung harga Grey Relational Grade (GRG), merupakan tahapan penggabungan harga GRC pada masing-masing respon menjadi harga respon tunggal yang disebut GRG.

$$\gamma_i = 1/2 n \sum \zeta_i(k) \dots\dots\dots (2.17)$$

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.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Workshop Politeknik Tunas Garuda SGC Sugar Group, Terbanggi Ilir, Kecamatan Bandar Mataram, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung dan pengujian hasil eksperimen berupa kekasaran permukaan dilakukan di PT Mitutoyo Indonesia, Cikarang Selatan, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat.

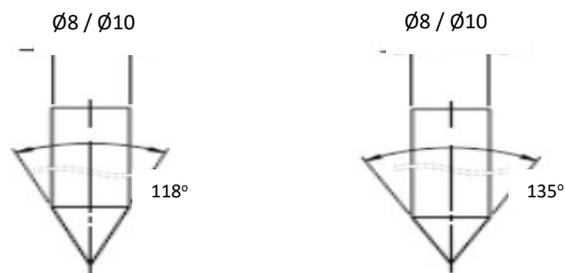
3.2. Bahan

3.2.1. Mata Bor

Drill (Mata Bor) adalah perkakas pembuat lubang atau alur yang efisien. Mata bor yang paling sering digunakan adalah bor spiral, karena penyaluran serpih (geram) yang baik karena alur-alurnya yang berbentuk sekrup, sudut-sudut sayat yang menguntungkan dan bidang potong dapat diasah tanpa mengubah diameter bor. Bidang potong bor spiral tidak radial tetapi digeser sehingga membentuk garis-garis singgung pada lingkaran kecil yang merupakan hati bor. Pahat bor *High Speed Steels* (HSS) merupakan paduan dari 0,75%-1,5% Carbon (C), 4%-4,5% Chromium (Cr), 10%-20% Tungsten (W) dan Molybdenum (Mo), 5% lebih Vanadium (V), dan Cobalt (Co) lebih dari 12% (Childs, dkk, 2000).

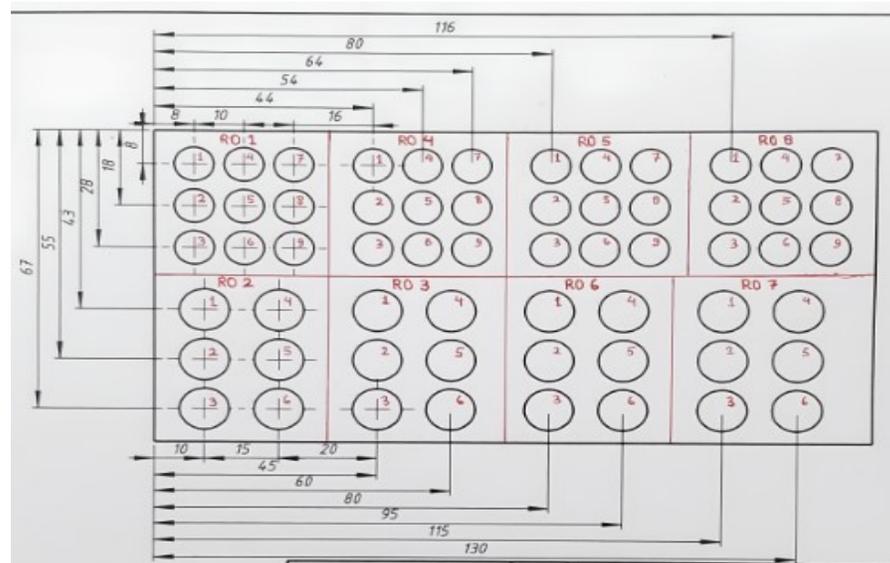


Gambar 3.1 Pahat bor diameter 8 mm dan 10 mm sebagai alat penelitian

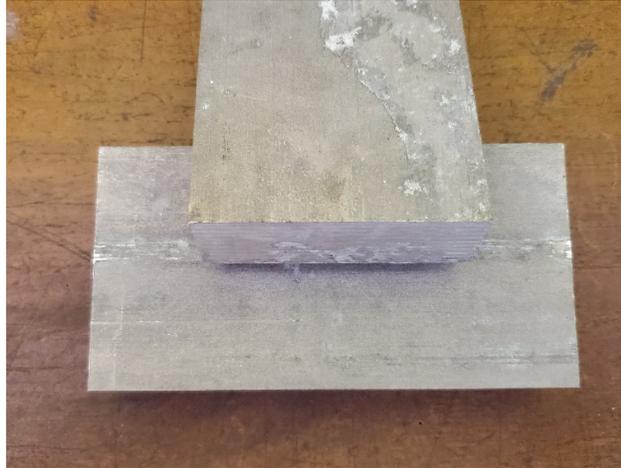


Gambar 3.2 Pahat bor dengan perubahan *point angle* yang berbeda

3.2.2. Bahan Benda Kerja



Gambar 3.3 Ukuran Material Benda Uji



Gambar 3.4 Material uji Magnesium AZ31B

3.3 Peralatan

Peralatan – peralatan yang digunakan untuk mencapai keberhasilan penelitian dapat diuraikan sebagai berikut :

3.3.1 .CNC Milling Machine



Gambar 3.5 CNC Milling Machine

Tabel 3.1 Spesifikasi CNC Milling Machining

No	Deskripsi	
1	Jenis	CNC Milling Machine
2	Merk	FEELER
3	Tipe	VMP-40A
4	X – axis travel	1020 mm
5	Y – axis travel	520 mm
6	Z – axis travel	505 mm
8	Spindle speed max	10000 rpm
9	Spindle power	11 Kw
11	Weight	6300 Kg
12	Buatan	Taiwan

Adapun prinsip kerja mesin CNC *Milling Machine* adalah putaran motor listrik diteruskan ke poros mesin sehingga poros berputar. Selanjutnya poros berputar yang sekaligus sebagai pemegang mata bor. Gerakan meja kekiri maupun kekanan mengikuti sumbu X, gerakan kedepan kebelakang dengan sumbu Y, sedangkan gerakan naik turun mengikuti sumbu Z. Mesin CNC Milling ini akan digunakan untuk mengebor benda kerja Magnesium AZ31 , dengan menggunakan *twist drill* HSS berdiameter 8 mm dan 10 mm.

3.3.2. 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 :

Tabel 3.2 Spesifikasi Kamera Mikroskop USB

Merk	Dino-Lite AM2111
Adjustable magnification	20x-50x, 200x
640x480	640x480
Frame rate	M Up to 30fps
Interface	USB 2.0
Dimension	10.5 cm (L) x 3.2 cm (D)
Unit Weight	100 gram



Gambar 3.6 Mikroskop USB

3.3.3. *Surface Roughness Tester*

Surface Roughness Tester merupakan alat pengukuran kekasaran permukaan. Pada penelitian, alat ini digunakan untuk menentukan nilai kekasaran permukaan benda uji setelah dilakukan proses pemesinan bubut magnesium AZ31B menggunakan mesin milling CNC.



Gambar 3.7 Alat *Surface Roughness Tester*

Adapun spesifikasi dari alat *surface roughness tester* tersebut adalah :

Tabel 3.3 Spesifikasi alat *surface roughness tester*

No.	Spesifikasi	
1.	Merk	Mitutoyo Formtracer SV-C3200
2.	Fabrikasi	Japan
3.	Ketelitian	$\pm(0.05+0.001L) \mu\text{m}^*$
4.	Fungsi Standart	IS '82/'94/'01, ISO, ANSI, DIN, VDA, dll

3.3.4. *Mastech Digital Clamp Meter*

Clamp meter adalah alat ukur arus yang berbentuk seperti penjepit (*clothespin-shaped*), dijepitkan mengelilingi kabel/konduktor bertegangan untuk mengukur arus listrik yang mengalir pada konduktor tersebut dengan satuan parameter pengukuran *Ampere*.

Pada dasarnya Clamps meter menggunakan prinsip induksi magnetik untuk menghasilkan pengukuran non kontak pada arus listrik. Arus listrik yang mengalir dikabel konduktor akan menghasilkan medan magnet. Sebuah transformator yang terdapat pada Clamps meter akan merasakan fluktuasi medan magnet tersebut dan kemudian mengkonversikan menjadi nilai ampere (arus listrik) sehingga kita dapat membacanya dilayar Clamps meter.



Gambar 3.8 Digital Clamp Meters Voltage Current Resistance Capacitance Tester

Tabel 3.4 Spesifikasi alat *Digital Clamp Meters*

No.	Spesifikasi	
1.	Merk	Mastech
2.	Model	RMS MS 2115B
3.	<i>Measurement</i>	up to 1000A
4.	<i>Power Supply</i>	DC 9V
5.	<i>Resolution Measuring</i>	(0,01A at 60A) (0,1A at 600A) (1A at 1000A)

3.4. Pengujian Pemesinan

Penelitian ini menggunakan parameter pemakanan 0,1 mm dan 0,3 mm (Groove, 2012), kecepatan putaran 890 rpm (Ibrahim, 2019), 1280 rpm, 1700 rpm (Astanto dkk, 2020) dan 2000 rpm pada pengaruh *point angle* yang bervariasi yaitu 118° dan 135° dengan mengacu pada penelitian Agustina *et al* (2019) dan diameter pahat 8 mm dan 10 mm.

Tabel 3.5 Data *Run Order* penelitian

Kode (Simbol)	Parameter Potong (Cutting Parameter)	satuan	Level / tingkatan			
			1	2	3	4
A	Kecepatan Spindle (n)	rpm	890	1280	1700	2000
B	Pemakanan (f)	mm/rev	0,1	0,3	-	-
C	<i>Point Angle</i> (θ)	$^{\circ}$	118	135	-	-
D	Diameter (d)	mm	8	10	-	-

Orthogonal Array L8 ($4^1 1. 2^3$)

L = rancangan bujur sangkar latin

8 = banyak baris atau eksperimen, Mix Level = banyak level, 4 = banyak faktor

Tabel 3.6 Data Rumus Penelitian dengan Metode Taguchi

Run Order	Putaran Spindle (rpm)	Pemakanan (mm/rev)	Point Angle (°)	Diameter Pahat (mm)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	2	1	1	2
4	2	2	2	1
5	3	1	2	1
6	3	2	1	2
7	4	1	2	2
8	4	2	1	1

Tabel 3.7 Besaran Level

Run Order	Putaran Spindle (rpm)	Pemakanan (mm/rev)	Point Angle (°)	Diameter Pahat (mm)
1	890	0,1	118	8
2	890	0,3	135	10
3	1280	0,1	118	10
4	1280	0,3	135	8
5	1700	0,1	135	8
6	1700	0,3	118	10
7	2000	0,1	135	10
8	2000	0,3	118	8

Pengujian dilakukan tanpa pendingin (*dry machining*) yang akan berpengaruh pada hasil kualitas permukaan lubang pengeboran.

Pengujian pengeboran dilakukan dengan data order L8 dengan dilakukan replika pengulangan 1x demi mendapatkan hasil rata-rata yang maksimal.

Tabel 3.8 Data Hasil Pengujian

Run Order	Keausan (mm)				Kekasaran/Ra (μm)			Arus Listrik (A)	
	R1	R2	Vb (mm)	T (min)	R1	R2	Ra (μm)	$\Delta i_2 - \Delta i_1$	Δi (A)
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Pengujian respon hasil dilakukan terhadap kekasaran permukaan (Ra) dilakukan untuk melihat kondisi setelah dilakukan pengeboran dengan menggunakan *surface roughness tester*. Kemudian dilakukan pengecekan kondisi keausan pahat (Vb) menggunakan mikroskop USB untuk mengetahui besar nilai keausan pahat yang terjadi dan mengukur umur pahat (T), serta dilakukan pengecekan respon pengaruh arus listrik (*Ampere*) untuk mengetahui pengaruh arus listrik pada parameter yang diujikan.

Setelah semua parameter sudah siap selanjutnya melakukan pengujian yaitu dengan mengukur dan mempersiapkan benda kerja Magnesium AZ31B sebelum *setting* mesin.

Melakukan *setting* benda kerja pada meja kerja mesin, memastikan pencekaman benar-benar kuat dan aman.

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



Gambar 3.9 Setting kamera mikroskop USB

Membuat program pemesinan dengan memasukkan besaran parameter yang sudah ditetapkan dalam rancangan Taguchi.

Melakukan simulasi gerakan pemesinan sesuai program yang telah dibuat.

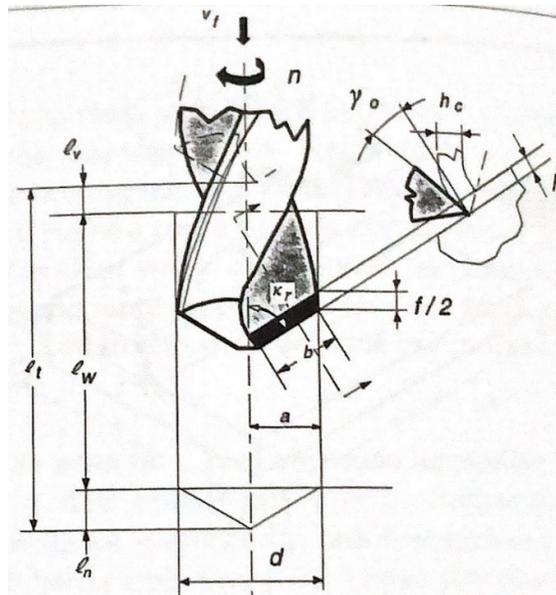
Melakukan inspeksi dan evaluasi terkait safety secara menyeluruh terhadap proses simulasi pemesinan.

Melakukan proses pemesinan yang sesungguhnya sebanyak 8 *run order* menggunakan pahat *twist drill* HSS pada benda kerja Magnesium AZ31B sesuai dengan table 3.7.

Pengambilan gambar menggunakan kamera mikroskop USB dilakukan setiap lubang.

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.



Gambar 3.10 Titik keausan yang terjadi pada proses pengeboran (Taufiq, 2007)

Keterangan :

l_w = Panjang pemotongan benda kerja (mm)

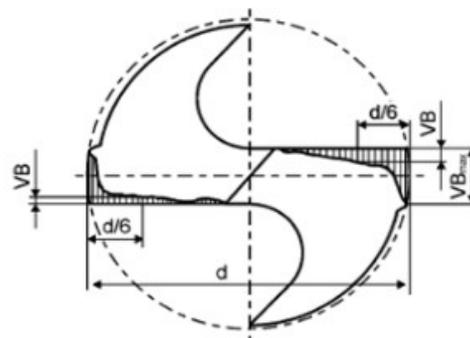
d = diameter pahat (mm)

K_r = sudut potong utama ($^\circ$)

n = putaran *spindle* (rpm)

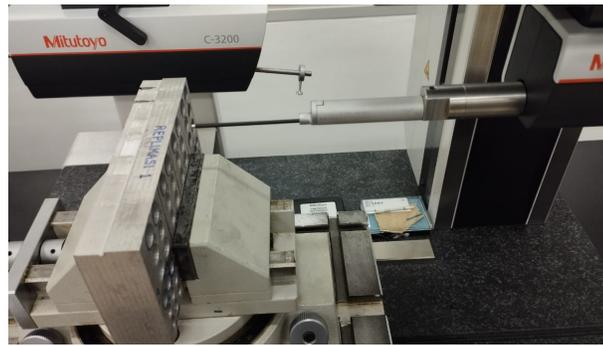
v_f = kecepatan makan (mm/min)

b = keausan yang terjadi (mm)



Gambar 3.11 Keausan tepi (V_b) (Kalpakjian, 2014)

Untuk kekasaran permukaan diukur setelah selesai semua proses pemesinan. Dari keseluruhan jumlah lubang setiap spesimen diukur pada beberapa lubang yaitu 3 dan 6 atau 3, 6, 9 pada setiap Run Order, masing-masing pengukuran diambil datanya 2 kali yaitu bagian atas dan bawah menggunakan *Surface Roughness Tester*. Mesin yang digunakan adalah *Formtracer Avant* merk Mitutoyo, dengan *stylus type* radius 2μ dengan panjang *stylus* 44,7 mm dan tinggi *stylus* 7,6 mm. Prosedur pengukuran dengan menggunakan *setting* parameter *cut off* 2,5 mm dengan panjang evaluasi 12,5 mm (dikarenakan R_a yang digunakan 3,2 mm, panjang evaluasi didapatkan dari panjang *cut off* (2,5 mm) dikalikan 5, dimana angka 5 didapatkan dari standar ISO 4288).



Gambar 3.12 Pengukuran kekasaran permukaan

Untuk nilai arus listrik diambil ketika proses pemesinan atau pengambilan data berjalan. Adapun alat yang digunakan adalah *clamps* meter digital dimana alat tersebut akan merasakan fluktuasi medan magnet tersebut dan kemudian mengkonversikan menjadi nilai ampere (arus listrik) sehingga kita dapat membacanya dilayar *clamps* meter. Caranya dengan meletakkan alat

tersebut ke panel utama listrik yang digunakan pada mesin milling CNC tersebut.



Gambar 3.13 Pengukuran arus listrik dengan clamp meter digital

3.5. Desain Eksperimen *Taguchi Gray Relation Analysis*

Setelah mendapatkan data pada hasil pengujian penelitian maka selanjutnya akan dilakukan analisis varian dengan menggunakan software Minitab 21. Adapun rencana analisis varian yang akan dilakukan yaitu :

1. Menghitung *Signal Noise Ratio (SNR) (Taguchi Method)*

Pencarian SN Ratio untuk masing-masing respon kemudian dilakukan olah data dengan metode taguchi untuk mencari kombinasi faktor yang optimal bagi setiap respon parameter penelitian.

Adapun rumus dan Tabel 3.8 SN Ratio yaitu sebagai berikut :

$$\text{SNR STB} = -10 \log [X_i(f^2)] \dots\dots\dots(3.1)$$

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

Tabel 3.9 Hasil Percobaan dan hasil perhitungan S/N Ratio umur pahat, kekasaran permukaan dan arus listrik.

RO	Putaran Spindle (rpm)	Feeding (mm/rev)	Point Angle (o)	Diameter Pahat (mm)	Umur Pahat (min)	Kekasaran Permukaan (mm)	Arus Listrik (A)	S/N Ratio
1	890	0,1	118	8				
2	890	0,3	135	10				
3	1280	0,1	118	10				
4	1280	0,3	135	8				
5	1700	0,1	135	8				
6	1700	0,3	118	10				
7	2000	0,1	135	10				
8	2000	0,3	118	8				

Kemudian data di olah menggunakan aplikasi ANOVA untuk melihat pengaruh parameter pengeboran terhadap respon umur pahat, kekasaran permukaan dan arus listrik. Kemudian dilakukan *main effect plot* dengan Anova terhadap S/N ratio dengan software minitab. Adapun Tabel 3.9 data yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.10 Faktor optimal masing-masing respon

Respon	Metode Taguchi				Faktor signifikan
	Faktor optimal				
Umur Pahat (min)					
Kekasaran Permukaan (μm)					
Arus Listrik (A)					

Tabel 3.11 Analisis Varian Untuk S/N Rasio Keausan Pahat, Kekasaran Permukaan dan Arus Listrik

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Persen Kontribusi (%)
Putaran							
Feeding							
Point Angle							
Diameter Pahat							
Residual Error							
Total							

Kemudian data tersebut di hitung menjadi data mean respon dengan cara sebagai berikut :

$$\text{Mean respon faktor} = \frac{\sum y_1 + y_2 + y_3 \dots + y_n}{n} \dots \dots \dots (3.2)$$

Perhitungan tersebut dilakukan pada tiap level yang dimiliki faktor dimana menggunakan pengolahan data menggunakan Metode Analisis *Taguchi large is better* atau *smaller is better*. Adapun Tabel 3.11 yang menerangkan sebagai berikut :

Tabel 3.12 Response table S/N rasio umur pahat, kekasaran permukaan dan arus listrik

Level	Putaran (rpm)	Pemakanan (mm/rev)	Point Angle (°)	Diameter (mm)
1				
2				
3				
4				
Delta				
Rank				

2. Normalisasi SNR (*Grey Relation Analysis*)

Setelah didapatkan harga S/N Ratio untuk masing-masing respon karakteristik dilanjutkan dengan proses optimasi menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)} \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana :

$X_i^*(j)$ = 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

Adapun Tabel 3.13 dari normalisasi 4 faktor dengan 3 respon yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.13 Normalisasi SNR

Run Order	Normalisasi SNR		
	Umur Pahat (min)	Kekasaran Permukaan (μm)	Arus Listrik (A)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

3. Menghitung Nilai Deviation Sequence dan Gamma (Grey Relational Coefficient / GRC)

Menghitung jarak $\Delta oi(j)$ yang merupakan nilai absolut dari selisih antara nilai maksimum hasil normalisasi $Xo * (j)$ dengan data yang telah dinormalisasi $Xi * (j)$ pada titik j. Untuk mencari nilai Delta yaitu seperti persamaan berikut :

$$\Delta 0(j) = | X_0^*(j) - X_i^*(j) | \dots\dots\dots (3.4)$$

Dimana : $X_0 * (j) = 1$ (nilai terbesar normalisasi S/N Ratio diinversikan sebesar 1)

GRC menunjukkan hubungan antara kondisi terbaik dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi Sedangkan untuk nilai GRC di dapatkan dengan rumus sebagai berikut :

$$\zeta i^*(k) = \frac{\Delta min + \zeta \Delta max}{\Delta oi(k) + \zeta \Delta max} \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana :

Δmin = nilai minimum dari $\Delta oi(j)$

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

ζ = koefisien pembeda, biasanya diambil nilai 0,5

Sedangkan Tabel 3.14 hasil perhitungan yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.14 Perhitungan Deviation Sequence dan GRC

Run Order	Deviation Sequence			Grey Relational Coefficient		
	Keausan Pahat (mm)	Kekasaran Permukaan (μm)	Arus Listrik (A)	Keausan Pahat (mm)	Kekasaran Permukaan (μm)	Arus Listrik (A)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

4. Menghitung Nilai Grey Relational Grade (GRG)

proses menghitung harga Grey Relational Grade (GRG), merupakan tahapan penggabungan harga GRC pada masing-masing respon menjadi harga respon tunggal yang disebut GRG.

$$\gamma_i = 1/n \sum \zeta_i(k) \dots\dots\dots (3.6)$$

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. Adapun Tabel 3.15 pada perhitungan yang akan dilakukan yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.15 Grey Relation Grade (GRG)

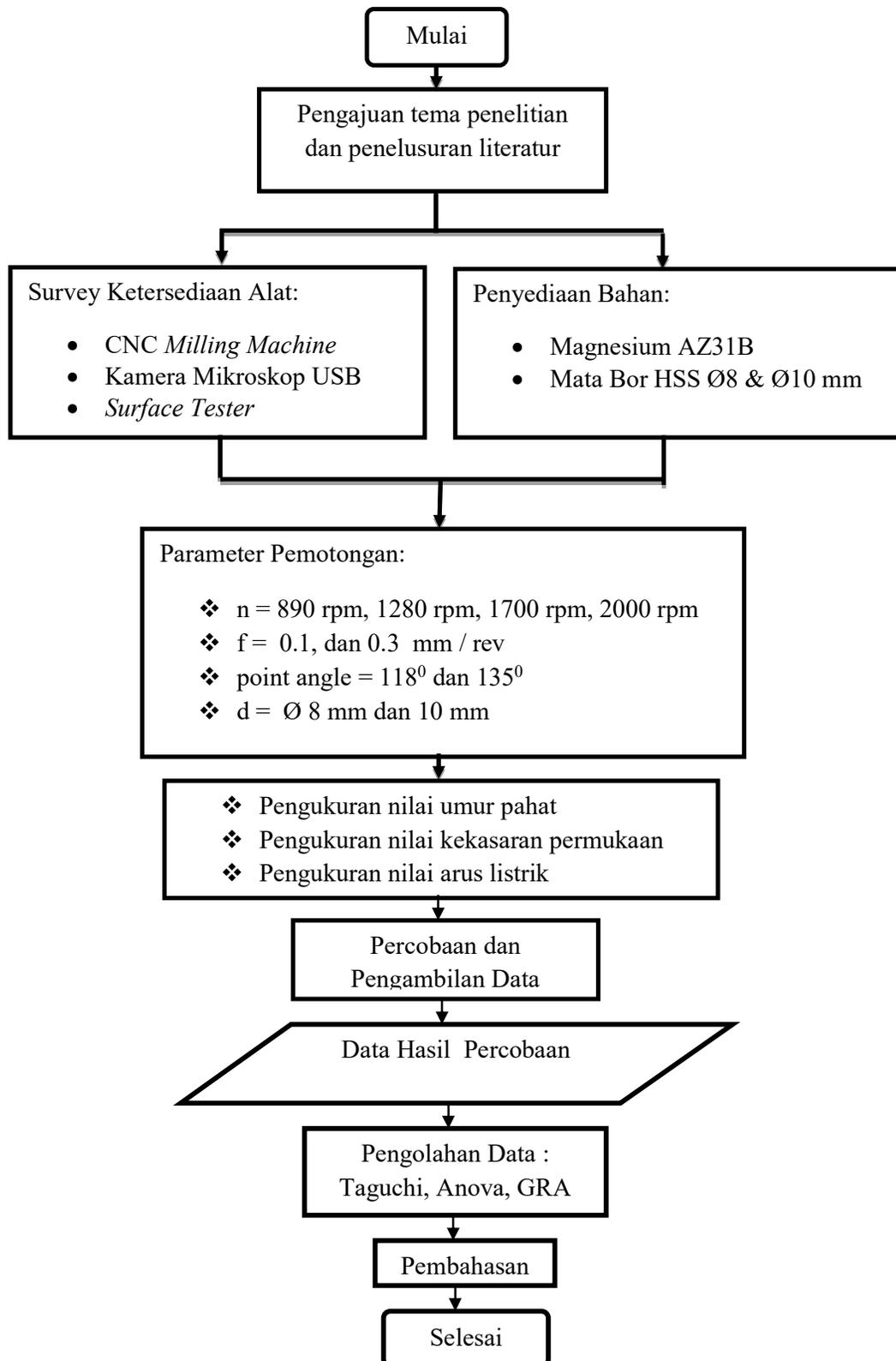
Run Order	GRG	Rank
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

5. ANOVA

Cara penggunaan software ANOVA yaitu sebagai berikut :

- a. Pilih Stat> ANOVA> One-Way.
- b. Pilih Data respons ada dalam satu kolom untuk semua tingkat faktor.
- c. Sebagai Respons, masukkan Nilai S/N ratio. Di Factor, masukkan putaran, pemakanan, point angle dan diameter, ,Klik Perbandingan.
- d. Di bawah Prosedur perbandingan dengan asumsi varian sama.

3.6. Diagram Alir Penelitian



V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Dari pembahasan dalam bab sebelumnya dapat diambil simpulan sebagai berikut :

1. Hasil pengujian pengeboran yang diperoleh memiliki kondisi pengaruh yang berbeda berdasarkan parameter pengeboran terhadap respon pengaruh umur pahat, kekasaran permukaan dan pengaruh arus listrik. Kombinasi faktor optimal untuk umur pahat adalah putaran *spindle* 890 rpm, *feeding* 0,1 mm, *point angle* 118° dan diameter pahat 8 mm. Untuk kombinasi faktor optimal untuk kekasaran permukaan adalah putaran *spindle* 2000 rpm, *feeding* 0,3 mm, *point angle* 135° dan diameter pahat 10 mm. Sedangkan kombinasi faktor optimal untuk pengaruh arus listrik adalah kecepatan *spindel* 1280 rpm, *feeding* 0,1 mm, *point angle* 118° dan diameter pahat 10 mm.
2. Dengan menggunakan Metode Taguchi, hasil penelitian mengungkapkan bahwa faktor yang memiliki kontribusi paling berpengaruh terhadap respon umur pahat namun tidak signifikan adalah *feeding* dengan kontribusi mencapai 49,77%, putaran *spindle* 30,35% dan diameter pahat sebesar 13,98% . Kemudian terhadap kekasaran permukaan memiliki kontribusi paling berpengaruh namun tidak signifikan adalah diameter pahat dengan kontribusi 29,66% dan *feeding* dengan kontribusi 29,48%.

Sementara itu, faktor pengaruh arus listrik tidak terlalu memiliki dampak signifikan, namun faktor yang memiliki kontribusi paling berpengaruh terjadi pada putaran *spindle* dengan tingkat kontribusi mencapai 38,35% dan *feeding* dengan persentase 21,96%.

3. Melalui penerapan Metode GRA (*Grey Relational Analysis*), ditemukan kombinasi optimal dari faktor putaran *spindle*, *feeding*, *point angle* dan diameter pahat terhadap respon pengaruh umur pahat, kekasaran permukaan dan pengaruh arus listrik yang paling efektif adalah A1 B1 C1 D1 (putaran *spindle* 890 rpm, *feeding* 0,1 mm, *point angle* 118° dan diameter pahat 8 mm).

5.3. Saran

Saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Saat melakukan proses *drilling* sebaiknya dilakukan tanpa ada waktu jeda saat proses bor agar mendapatkan hasil yang lebih baik.
2. Dapat dilakukan pembuatan *software* perhitungan komputasi pada saat melakukan perhitungan Taguchi GRA agar mempermudah dan mempercepat dalam menentukan nilai kondisi optimum yang didapatkan.
3. Untuk pengambilan data pengaruh arus listrik, sebaiknya ditambahkan juga pengaruh terhadap nilai tegang listriknya, sehingga bisa lebih dimaksimalkan untuk mengetahui daya pemesinan kedepannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z., 2010. Mekanisme Keausan Pahat Pada Proses Pemesinan : Sebuah Tinjauan Pustak. Jurnal. Momentum, Vol. 6, No. 1, April 2010 : 9 – 16.
- Adhvaryu,A. and Liu,Z., 2005. *Synthesis of novel Alkoxilated Triacylglycerols and their lubricant base oil properties*. Journal Industrial Crops and Product 21:113-119.
- Alaitz G., 2007. *Machine Tool Utilisation Phase: Costs and Environmental Impacts with a Life Cycle View Master of Science Thesis Stockholm 2007*
PRESENTED AT INDUSTRIAL ECOLOGY ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
- Agustina, B., Berzosa F., Rubio E. M. and Marin M. M., 2019. Experimental study of magnesium drilling based on the surface quality. 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Procedia CIRP 79 (2019) 74–78.
- Ansyori A. dan Saputra R., 2019. Pengaruh Diameter Mata Bor Terhadap Tingkat Kehalusan Permukaan Lubang Bor Pada Proses Permesinan Bor Magnesium AZ31. Jurnal Teknik Mesin Universitas Bandar Lampung, Vol 7 No.1, Oktober 2019.
- Askew,M. F., 2004. *Bio-Lubricants-Market Data Sheet* : IENICA-Inform Project.
- Azhar, M. C., 2014. *Analisa Kekasaran Permukaan Benda Kerja dengan Variasi Jenis Material dan Pahat Potong*. Skripsi. Universitas Bengkulu. Bengkulu.

- Astanto L. P. G. D, Burhanuddin Y. dan Ibrahim G. A., 2020. Optimasi nilai keausan pahat dan kekasaran permukaan benda kerja terhadap parameter pemesinan milling dengan benda kerja magnesium menggunakan kombinasi metode taguchi dan grey relational. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin TURBO* Vol. 9, No. 1, 2020.
- Badan Pusat Statistik, 2008. *Statistik Industri Manufaktur (manufacturing industrial statistic) Indonesia 2017*. Jakarta : Badan Pusat Statistik.
- Bagchi, T.P.1993. *Taguchi Method Explained: Practical Step to Robust Design*. Prentice Hall of India Private Limited. New Delhi.
- Bagchi, 2013. *Taguchi Methods Explained Practical Steps to Robust Design*. New Delhi: Published by Prentice – Hall of India Private Limited, M-97, Connaught Circus, and Printed by Bhuvnesh Seth at Rajkamal Electric Press, B-35/9, G.T.
- Boothroyd, 1975. *Fundamental of Metal machining and Machine Tool*. Hemisphere Publishing Co.
- Bronfin, B., 2007. "Elektron 21 specification". Dalam Kainer, Karl. *Magnesium: Proceedings of the 7th International Conference on Magnesium*.
- Chang- Xue, 2002. Mean Flank Temperature Measurement In High Speeddry Cutting Of Magnesium Alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 119–123.
- Childs T., Maekawa K., Obikawa T. and Yamane Y., 2000. “*Metal Machining Theory and Applications*”, by John Wiley & Sons Inc, New York Toronto. Page 416.
- El-Hofy H. A. G., 2013. *Fundamentals of machining processes: conventional and non conventional process*.

- Febriana, S. L., Rudy P. dan Yan T., 2023. Analisa Pengaruh Kondisi Pemotongan Terhadap Konsumsi Energi Listrik Pada Mesin Freis HERCUS 7264. *Jurnal Tekno Mesin Vol. 9 No. 2 (2023)*.
- Gunstone, F. D. and Padley, F. B., 1998. *Lipid technologies and Applications*. Marcel Dekker. Inc. New York. Basel : Hongkong
- Hanum, H , 2011. Perbandingan Metode Stepwise, Best Subset Regression, dan Fraksi dalam Pemilihan Regresi Berganda Terbaik, *Jurnal Penelitian Sains.14(2A):1-6 .Sumatera Selatan :Universitas Sriwijaya*
- Hao, 2005. *Introduction to Manufacturing Process*. 3rd Ed. Mc Graw Hill Book.Co
- Hao, 2005. *Soft Plasma Treated Surfaces : Tailoring of Structure and properties for Biomaterial Application*. John Willey & Sons. Inc.
- Hamni, A. dan Ibrahim G. A., 2020. Analisis Keausan Pahat Pada Pemesinan Bor Magnesium AZ31 Menggunakan Metode Taguchi. *Jurnal Teknik Mesin - ITI Vol. 4, No. 1, Februari 2020*.
- Harwig, A., 2001. *Role of magnesium in genomic stability*. Mutation Research /Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis;475, pp. 113-121.
- Hendra, 2005. *Pengaruh Kondisi Pemotongan Pahat Gurdi terhadap keausan pahat*. Jakarta
- Hwang H. S. and Erhan, S. Z., 2005. Synthetic Lubricant Base stock from Epoxidized Soybean oil and Guerbet Alcohol. *Journal Industrial Crops and Products*.
- Ibrahim, G. A., Achmad Y. dan Robby S., 2018. Efek Pelumasan Metode Minimum Quantity Lubrication (MQL) Terhadap Kualitas Benda Kerja Magnesium. *Jurnal Teknik Mesin Univ. Muhammadiyah Metro Turbo Vol. 7 No. 2*.

- Ibrahim, G. A., Burhanuddin Y. dan Didiek E., 2019. Analisis Kepresisian Lobang Bor Pada Pemesinan Magnesium AZ31 Menggunakan Metode Taguchi. *Jurnal Teknik Mesin Untirta Vol. V, No. 1, April 2019, hal. 29 – 33.*
- Jack W. Chaplin, 1976. *Metal Manufacturing Technology*.McKnight Publishing Company, Bloomington , Illinois.
- Kalpakjian S. and Schmid S. R., 2001. *Manufacturing Engineering and Technology*. International edition ,Prentice Hall. New Jersey
- Kalpakjian S. and Schmid S. R., 2002. *Manufacturing Engineering and Technology*. International edition ,Prentice Hall. New Jersey
- Kalpakjian, S., 2014. *Manufacturing Engineering and Technology*. Chicago: Illinois Institute of Technology.
- Ketaren S., 1986. *Pengantar Teknologi Minyak dan Ternak*. Jakarta UI-Press
- Klocke F. and Eisenblaetter G., 1997. *Dry Cutting*. Annals of CIRP Manufacturing Technology Vol. 46(2), pp.519-526.
- Klocke F. and Eisenblaetter G., 1997. *Dry Cutting*. Annals of CIRP Manufacturing Technology Vol. 46(2), pp.519-526.
- Kardonowy and David N. A., 2002. *Power Assessment of Machining Tools*. Bachelor of Science Thesis in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Kwo Z. C. and Teng S. S., 2002. *Optimizing Drilling Condition for AZ61A Magnesium Alloy*. Material Transaction, Vol.43, No.8. pp 2148 to 2156. The Japan Institue of metals.
- Leslie, 1983. *The Physical Metallurgy of Steels*. Mc Graw-Hill, Tokyo Japan.
- Mahrudi H. dan Burhanuddin Y., 2013. *Rancang Bangun Aplikasi Thermovision Untuk Pemetaan Distribusi Suhu Dan Permulaan*

Penyalaan Magnesium Pada Pembubutan Kecepatan Tinggi. Jurusan Teknik Mesin. Universitas Lampung. Bandar Lampung.

Makmur, 2010. *Analisa Pengaruh Kecepatan Potong Proses Pembubutan Baja Amutit K460 terhadap Umur Pahat HSS.*

Mukun, 1995. *Karakteristik Pemesinan kering.* , Jurnal, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Padang.

Mulyana, A., dan Tjahjono, E. W., 2013. *Penelitian Teknologi Proses Pembuatan Polyolester sebagai bahan dasar minyak pelumas sintetis. Makalah Seminar Teknologi untuk Negeri.* Pusat Pengkajian dan Penerapan Teknologi Industri Proses: BPPT.

Patil A. N., Walke G. A. and Gawkhare M., 2019. Grey Relation Analysis Methodology and its Application. *International Journal of Multidisciplinary. Volume-04 Issue-02 February 2019.*

Rahdiyanto, 2010. *Proses Drilling(bor/gurdi.* PTM (FT-UNY).

Rochim T., 1993 . *Proses Permesinan.Higher Education Development Support Project.* Jakarta.

Rochim T., 1993. *Teori dan Teknologi Proses Permesinan,* HEDS, Jakarta.

Rochim, T., 2007. *Klasifikasi Proses Gaya dan Daya Pemesinan,* Institut Teknologi Bandung.

Rubio E. M., Villeta M., Carou D. and Saá A. *International Journal of Precision Engineering Manufacturing. 2014. Vol. 14 (6) , p. 995.*

Santhakumar J. and Iqbal U, M., 2022. Optimization of process variables for surface roughness and tool wear deviation of AZ31 alloy during face milling. *AIP Conference Proceedings 2460, 040006.*

- Sultan, A. Z., Sharif S. and Kurniawan D., 2015. Effect of Machining Parameters on Tool Wear and Hole Quality of AISI 316L Stainless Steel in Conventional Drilling. *Procedia Manufacturing 2 (2015) 202 – 207.*
- Saputro, H., Purbosari D. dan Wijayanto D. S., 2014. *Karakteristik Tingkat Kekerasan Permukaan Baja ST 40 Hasil pemesinan CNC Milling Zk 7070 Efek dari Kecepatan Pemakanan (Feed Rate) dan Awal Waktu Pemberian Pendingin.* Pendidikan Teknik Mesin UNS. Surakarta.
- Schey,1983. *Introduction to Manufacturing Process.* 3rd ed.Mc Graw-Hill, Education.
- Sreejith, P. S. and Ngoi, B. K., 2000. Dry Machining: Machining of the Future. *Journal of Materials Processing Technology, 101, 87-91.*
- Sudji M., 1988. *Dasar-dasar Metrologi Industri.* Jakarta: Dirjen Dikti Depdikbud.
- Sulistiyanti, S. R., Burhanudin, Y. dan Harun, S., 2012. “*Characterization of Cutting Temperature and Ignition Phenomena of Magnesium Chip Using Infrared Imaging,*” *Adv. Mater. Res.*, vol. 588–589, pp. 1744–1747.
- Sugiarto, 2009. *Struktur Modal, Struktur Kepemilikan Perusahaan, Permasalahan Keagenen & Informasi Asimetri.* Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Susastro, Handayani, S. U., Atmanto, I. S. dan Pangestu, M. A., 2022. Pengukuran Parameter Energi Listrik Pada Mesin CNC Milling Pada Beberapa Tingkat Kecepatan Potong. *Jurnal Riset Sains dan Teknologi Volume 6 No. 2 September 2022, 131-139.*
- Tajdeen, A., Megalingam, A., Kumar, M. and Kumar Selva B., 2018. Multiresponse Optimization Of Drilling Process Parameters of AZ 31 Magnesium Alloys Using Gray Relational Analysis Technique. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD). Vol. 8, Special Issue 7, Oct 2018, 39-46.*

- Tornshoff, H. K. and Brinkomeier, 1965. *Determination of the Mechanical and Thermal Influences on Machined Surface by Microhardness and Residual Stress Analysis*. Ann.EIRP 29, pp.519-532.
- Tönshoff H. K. and Winkler J., 1997. *Surface and Coating Technology*. 1997. Vol. 94-95, p. 610
- Tornshoff .H. K. and Mohlfeld, A.1997. *PVD Coating for new Protection in Dry Cutting Operations*. Institute for Production and Macchine Tools. University of Hannover, Germany.
- Villeta M, Agustina B, Sáenz d. P. J. M. and Rubio E. M., 2012. *International Journal of Advanced Manufactruring Technology*. 2012. Vol. 60 (9-12), p. 1237.
- Widarto, 2008, *Teknik Pemesinan*, Jakarta : Depdiknas.
- Witte F, Hort N, Vogt C, Cohen S, Kainer KU and Willumeit R., 2008. Degradable Biomaterials Based on Magnesium Corrosion. *Current Opinion Solid State Materials Science* ;12, pp. 63-72.
- Wulandari, 2011. Perkembangan Kelapa Sawit Riau. <https://www.academia.edu/www.stat.ualberta.ca/~hooper/teaching/misc/Pvalue.pdf>.
- Yunus A,Cengel, 2002. *Heat Transfer a Practical Approach*. University of Nevada, Reno, Mc Graw Hill, Erlangga.
- Zhang, X., Yuan , G., Mao, L., Niu, J., Fu, P. and Ding, W.2012. Effect of extrusion and Heat Treatment on the Mechanical Properties and Biocorrosion Behaviour of a Mg-Nd-Zn-Zr Alloy. *Journal of The Mechanical Behaviour of Biomedical Materials* ;7, pp. 77- 86.