

SKRIPSI

**PENGARUH VARIABEL PERMESINAN TERHADAP KUALITAS
PEMBUBUTAN BAJA AISI 1037 DENGAN MENGGUNAKAN PAHAT
HSS**



Oleh:

Muhammad Fatur

D021 18 1329

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2023

SKRIPSI

**PENGARUH VARIABEL PERMESINAN TERHADAP KUALITAS
PEMBUBUTAN BAJA AISI 1037 DENGAN MENGGUNAKAN PAHAT
HSS**

DISUSUN DAN DIAJUKAN OLEH :

**MUHAMMAD FATUR
D021 18 1329**

**Merupakan Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2023

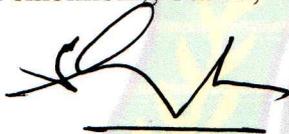
LEMBAR PENGESAHAN**PENGARUH VARIABEL PERMESINAN TERHADAP KUALITAS
PEMBUBUTAN BAJA AISI 1037 DENGAN MENGGUNAKAN PAHAT
HSS****Disusun dan diajukan oleh****MUHAMMAD FATUR****D021 18 1329**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada Tanggal, 25 Juli 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

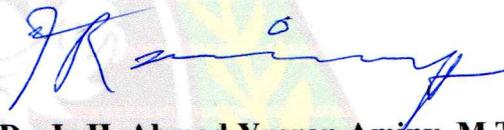
Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng . M.T

Nip. 19570914 198703 1 001

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. H. Ahmad Yusran Aminy. M.T

Nip. 19580921 1986 03 1003

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T.

NIP. 19720825 200003 1 001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda – tangan dibawah ini:

NAMA : MUHAMMAD FATUR
NIM : D021 18 1329
JUDUL SKRIPSI : PENGARUH VARIABEL PERMESINAN TERHADAP KUALITAS PEMBUBUTAN BAJA AISI 1037 DENGAN MENGGUNAKAN PAHAT HSS

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan - bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Hasanuddin atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Hasanuddin.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Gowa, 9, 08 2023

Yang membuat pernyataan,



MUHAMMAD FATUR

**PENGARUH VARIABEL PERMESINAN TERHADAP KEKASARAN
PERMUKAAN HASIL PEMBUBUTAN MATERIAL BAJA AISI 1045
MENGUNAKAN PAHAT KARBIDA**

Nama : MUHAMMAD FATUR
Nim : D021 18 1329
Pembimbing I : Prof . Dr. Ir. H. ILYAS RENRENG.,MT
Pembimbing II : Dr. Ir. AHMAD YUSRAN AMINY., MT

ABSTRAK

Dunia industri manufaktur, keberhasilan suatu proses produksi sangat dipengaruhi oleh mesin-mesin produksi yang digunakan. Mesin - mesin ini banyak digunakan dalam pembuatan atau perbaikan komponen tertentu dalam suatu produk manufaktur. Proses pemesinan (machining) adalah proses pembuangan atau pengambilan material dalam bentuk potongan – potongan kecil (chip), yang tidak diinginkan dari suatu bahan material (workpiece) untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan sesuai dengan desain yang telah ditentukan sebelumnya. Baja merupakan salah satu logam yang banyak digunakan dalam berbagai bidang, terutama dalam bidang industri permesinan dan konstruksi. Salah satu dari sekian banyak jenis baja adalah baja AISI 1037 yang tergolong dalam baja paduan karbon sedang yang banyak digunakan sebagai bahan utama pada mesin seperti gear, batang penghubung piston dan terutama poros pada kendaraan bermotor dan industri. Kekasaran permukaan adalah bagian dari permukaan akhir (tekstur permukaan) yang bisa didefinisikan sebagai tanda yang ditinggalkan oleh tindakan dari proses produksi yang digunakan, seperti operasi balik. Faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan adalah parameter proses yang akan digunakan dalam proses penelitian. Tujuan penelitian ini adalah untuk (1) Mengetahui pengaruh parameter pembubutan terhadap kekasaran permukaan material baja AISI 1037 dengan tipe pemotongan orthogonal(2). Untuk mengetahui kontribusi yang dihasilkan oleh parameter pembubutan terhadap kekasaran permukaan hasil pembubutan material baja AISI 1037 berdasarkan metode taguchi(3). Untuk mengetahui optimasi kualitas kekasaran permukaan Hasil pembubutan material baja AISI 1037. Dari hasil analisis didapatkan Berdasarkan

metode taguchi variabel yang paling berpengaruh pada proses pembubutan tersusun sebagai berikut: Gerak makan (feed) dengan persen kontribusi sebesar 70,49 %, putaran spindel (n) dengan persen kontribusi sebesar 22,17 % dan kedalaman potong (a) dengan persen kontribusi sebesar 6.91%. Pembubutan yang paling optimal dihasilkan pada parameter bubut dengan gerak makan (feed) 0,05 mm/put, putaran spindel (n) 800 rpm dan kedalaman potong (a) 2 mm dengan nilai kekasaran permukaan 1,24 μm .

Kata kunci : Proses permesinan, Mesin bubut, Baja AISI 1037, Kekasaran permukaan

**PENGARUH VARIABEL PERMESINAN TERHADAP KEKASARAN
PERMUKAAN HASIL PEMBUBUTAN MATERIAL BAJA AISI 1045
MENGUNAKAN PAHAT KARBIDA**

Nama : MUHAMMAD FATUR
Nim : D021 18 1329
Pembimbing I : Prof . Dr. Ir. H. ILYAS RENRENG.,MT
Pembimbing II : Dr. Ir. AHMAD YUSRAN AMINY., MT

ABSTRACTIn the world of manufacturing industry, the success of a production process is greatly influenced by the production machines used. These machines are widely used in the manufacture or repair of certain components in a manufactured product. The machining process is the process of removing or taking material in the form of small pieces (chips), which are not wanted from a material (workpiece) to get the desired shape according to a predetermined design. Steel is a metal that is widely used in various fields, especially in the engineering and construction industry. One of the many types of steel is AISI 1037 steel which is classified as medium carbon alloy steel which is widely used as the main material in engines such as gears, piston connecting rods and especially shafts in motorized vehicles and industry. Surface roughness is that part of the surface finish (surface texture) which can be defined as the mark left by the actions of the production process used, such as turning operations. Factors that affect surface roughness are process parameters that will be used in the research process. The purpose of this study was to (1) determine the effect of turning parameters on the surface roughness of AISI 1037 steel material with orthogonal cutting type (2). . To find out the optimization of surface roughness quality AISI 1037 steel machining results. From the analysis results obtained based on the taguchi method the variables that have the most influence on the turning process are arranged as follows: Feed motion with a percent contribution of 70,49%, spindle rotation (n) with a contribution percentage of 22,17% and depth of cut (a) with a contribution percentage of 6,91%. The most optimal turning is produced on lathe parameters with a feed motion of 0.05 mm/put,

spindle rotation (n) 800 rpm and depth of cut (a) 2 mm with a surface roughness value of 1,24 μm

Keywords: Machining process, Lathe, AISI 1037 steel, Surface Roughness

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat serta kasih-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang mengambil judul : “Pengaruh Variabel Permesinan Terhadap Kualitas Pembubutan BAJA AISI 1037 Dengan Menggunakan Pahat HSS”.

Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) bagi mahasiswa program S-1 di program studi Jurusan Mesin Prodi Teknik Mesin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini.

Terselesainya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai, terutama kepada yang saya hormati:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc selaku rektor Universitas Hasanuddin.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Prof Dr. Eng. Jalaluddin, ST,MT selaku Ketua Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Dr. Muhammad Syahid, ST, MT selaku Sekertaris Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Prof . Dr. Ir. H. ILYAS RENRENG,.MT. selaku dosen pembimbing pertama skripsi saya yang telah memberikan kritik dan saran bimbingan maupun arahan yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, MT selaku pembimbing kedua atas segala bimbingan, arahan serta masukan selama penyusunan tugas akhir ini.

7. Bapak Marthen selaku Plp Laboratorium Teknologi Mekanik Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Bapak dan Ibu Dosen dan serta staff administrasi Departemen Teknik Mesin yang telah banyak membantu kami dalam mengurus dan memudahkan perjalanan berkas kami menuju Rektorat.
9. Kepada Dr.Eng Lukmanul Hakim Arma, ST., MT selaku Dosen yang membantu saya dalam pengujian kekasaran hasil pembubutan spesimen saya.
10. Kepada saudara(i) seperjuangan REACTOR'18 yang selalu ada dalam suka maupun duka. Khususnya kepada saudara Angga Asteriasti Aji, Rizal Hadi, Iksan serta teman-teman lain yang tidak sempat penulis sebutkan satu persatu.
11. Teristimewa kepada Orang Tua penulis Wasiat Morra dan Sally Tatengkeng dan saudaraku yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan pengorbanannya baik dari segi moral, materi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Buat sahabat – sahabat saya. Terima kasih atas dukungan dan doanya.

Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dan penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan menjadi bahan masukan dalam dunia pendidikan.

Gowa,, Juli 2023

Penulis

DAFTAR ISI

SKRIPSI.....	i
DAFTAR ISI	vi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Permesinan.....	4
2.2. Mesin Bubut	7
2.3. Bagian-bagian Mesin Bubut	9
2.3.1 Kepala tetap (<i>Headstock</i>)	9
2.3.2 Meja Mesin (<i>Bed</i>).....	9
2.3.3 Eretan (<i>Carriage</i>).....	9
2.3.4 Kepala lepas (<i>Tail stock</i>)	10
2.3.5 Penjepit pahat (<i>Toolpost</i>)	10
2.3.6 Pencekam (<i>Chuck</i>).....	10
2.3.7 Kran pendingin.....	10
2.4. Variabel Permesinan.....	11
2.5. Pahat Bubut.....	14
2.6. Pahat HSS	15
2.7. Baja AISI 1037	15
2.9. Metode <i>Taguchi</i>	16
2.9.1 Tahap Perencanaan.....	17
2.9.2 Tahap Pelaksanaan.....	19
2.9.3 Tahap Analisis	20
2.9.4 Rasio S/N	22
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	23
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	23
3.3 Metode Penelitian	26

3.4	Variabel Penelitian.....	26
3.4.1	Variabel Bebas	26
3.4.2	Variabel Terikat.....	27
3.5	Pelaksanaan Penelitian	27
3.5.1	Prosedur Proses Bubut.....	27
3.5.2	Pengambilan Data	27
3.5.3	Flowchart Penelitian	28
BAB 4 METODOLOGI PENELITIAN		29
4.1	Proses Pembubutan.....	29
4.2	Pengambilan Data Uji Spesimen	30
4.3	Menganalisis Hubungan Kecepatan spindel Terhadap Kekasaran Permukaan Akibat Gerak Makan.....	33
4.4	Menganalisis Hubungan Kedalaman potong Terhadap Kekasaran Permukaan Akibat Kecepatan spindel.....	37
4.5	Menganalisis Hubungan Gerak makan Terhadap Kekasaran Permukaan Akibat Kedalaman potong	41
4.6	Menganalisis Variabel Permesinan Yang Paling Berpengaruh Terhadap Kekasaran Permukaan Dengan Menggunakan Metode Taguchi	45
4.8	<i>Analisis Of Varians (ANOVA)</i>	47
BAB 5		49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	49
DAFTAR PUSTAKA		50
LAMPIRAN		52

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dunia industri manufaktur, keberhasilan suatu proses produksi sangat dipengaruhi oleh mesin-mesin produksi yang digunakan. Hal ini dikarenakan di tiap bengkel mesin konstruksi dan bengkel-bengkel pengerjaan logam, mesin-mesin ini banyak digunakan dalam pembuatan atau perbaikan komponen tertentu dalam suatu produk manufaktur. Salah satu mesin perkakas yang digunakan adalah mesin bubut. Mesin Bubut adalah mesin perkakas yang digunakan untuk memotong benda yang berputar. Bubut merupakan suatu proses pemakanan benda kerja dengan mensayat benda kerja yang berputar. Gerakan putar dari benda kerja disebut gerak potong relatif dan gerakan translasi dari pahat disebut gerak umpan. Proses bubut (*turning*) dalam industri manufaktur merupakan salah satu proses yang digunakan dalam pemotongan logam. Lebih kurang 80% dari keseluruhan kegiatan yang ada pada operasi proses pemotongan logam menggunakan proses bubut. (Azib, 2017)

Proses permesinan merupakan sesuatu yang sangat dibutuhkan pada pengerjaan manufaktur di industri saat ini. Salah satu permesinan yang paling sering ditemui saat ini adalah proses pembubutan. Mesin bubut merupakan salah satu *metal cutting machine* dengan gerak utama berputar, benda kerja dicekam dan berputar pada sumbunya, sedangkan alat potong (*cutting tool*) bergerak memotong sepanjang benda kerja, sehingga akan terbentuk geram. (Nurdjito dan Arifin, 2015)

Penggunaan baja telah mengalami peningkatan yang cukup pesat di industri manufaktur, dimana sebagian ditentukan oleh nilai ekonomisnya. Baja ST 37 merupakan salah satu jenis baja karbon rendah yang memiliki sifat mudah di tempa dan mudah di proses permesinan. Pahat bubut HSS banyak digunakan untuk melakukan proses permesinan baja ST 37 dalam pembuatan roda gigi, poros dan baut. (Surdia dan Saito, 1999)

Proses bubut umumnya menggunakan pahat High Speed Steel (HSS). HSS merupakan baja paduan tinggi dengan unsur paduan utama karbon (C), Tungsten (W), Vanadium (V), Molybdenum (Mo), Cromium (Cr) ataupun Cobalt (Co). Jenis

HSS yang dikenal antara lain HSS jenis Tungsten, HSS jenis Tungsten-Molybdenum dan High Performance HSS.(Rahmanto&Kamaruddin,2016)

Pemotongan tegak (Orthogonal cutting) merupakan suatu sistem pemotongan dengan gerakan relatif antara mata pahat dan benda kerja membentuk sudut potong tepat 90° atau yang dinamakan dengan sudut potong utama (K_r), dan besarnya lebar mata pahat lebih besar dari lebar benda kerja yang akan dipotong.(Susarno,2012)

Berdasarkan uraian diatas, maka peneliti akan membahas tentang **“PENGARUH VARIABEL PERMESINAN TERHADAP KUALITAS PEMBUBUTAN BAJA AISI 1037 DENGAN MENGGUNAKAN PAHAT HSS”** untuk membuktikan bahwa parameter apa yang paling berpengaruh terhadap kualitas pembubutan sesuai dengan parameter permesinan [Kecepatan spindle (rpm), Kedalaman potong (mm), dan Gerak makan (mm/put)].

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, terdapat beberapa masalah yang dapat dirumuskan yaitu :

1. Bagaimana pengaruh parameter bubut dengan kedalaman potong 0,5 mm,1 mm,1,5 mm,2 mm ,putaran mesin 200 rpm, 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm dan kecepatan makan 0,05 mm/put, 0,17 mm/put, 0,30 mm/put dan 0,42 mm/put terhadap kekasaran permukaan dengan tipe pemotongan orthogonal ?
2. Bagaimana kontribusi yang dihasilkan oleh parameter pembubutan berdasarkan metode taguchi ?
3. Bagaimana optimasi kualitas pembubutan yang dihasilkan ?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Untuk mengetahui pengaruh parameter bubut dengan kedalaman potong 0,5 mm,1 mm,1,5 mm, 2 mm ,putaran mesin 200 rpm, 400 rpm, 600 rpm,

800 rpm dan kecepatan makan 0,05 mm/put, 0,17 mm/put 0,30 mm/put dan 0,42 mm/put terhadap kekasaran permukaan dengan tipe pemotongan orthogonal.

2. Untuk mengetahui kontribusi yang dihasilkan oleh parameter pembubutan berdasarkan metode taguchi.
3. Untuk mengetahui optimasi kualitas pembubutan yang dihasilkan.

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Material yang digunakan adalah baja AISI 1037 berbentuk silinder dengan permukaan rata.
2. Menggunakan pahat HSS dimana kondisi pahat dianggap selalu sama.
3. Parameter permesinan yang divariasikan adalah Kecepatan spindel (200 rpm, 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm), Kedalaman potong (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm), dan Kecepatan makan (0,05 mm/put, 0,17 mm/put, 0,30 mm/put, 0,42 mm/put).

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Memberikan pengetahuan tentang pengaruh parameter permesinan terhadap kualitas pembubutan baja AISI 1037 .
2. Dapat memberikan informasi sebagai referensi tambahan dibidang Manufaktur.
3. Sebagai pemenuhan syarat untuk memperoleh gelar S1 pada program studi Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Permesinan

Proses Permesinan adalah istilah yang mencakup banyak koleksi proses manufaktur yang dirancang untuk menghilangkan bahan yang tidak diinginkan, biasanya dalam bentuk *chip*, dari benda kerja. Proses Permesinan digunakan untuk merubah hasil coran, tempa, atau blok logam yang sudah terbentuk sebelumnya menjadi bentuk yang diinginkan, dengan ukuran dan hasil akhir yang ditentukan untuk memenuhi persyaratan desain. Hampir setiap produk yang diproduksi memiliki komponen yang memerlukan pemesinan, seringkali dengan presisi tinggi. Oleh karena itu, kumpulan proses ini adalah salah satu proses yang paling penting dari proses manufaktur dasar karena nilai tambah pada produk akhir. Dengan cara yang sama, proses pemesinan seringkali lebih mahal.

Sebagian besar aplikasi industri permesinan adalah logam. Meskipun proses pemotongan logam telah menolak analisis teoretis karena kerumitannya, penerapan proses ini di dunia industri tersebar luas. Proses pemesinan dilakukan pada berbagai peralatan mesin. Contoh lain dari peralatan mesin dasar adalah mesin giling, bor tekan, penggiling, pembentuk, mesin penggerek, dan gergaji. (ASM Internasional.Vol 16,1995)

Setiap jenis alat mesin dasar memiliki banyak konfigurasi yang berbeda. misalnya, mesin bubut turet mesin bubut, mesin pelacak roda, atau mesin sekrup otomatis. Mesin bubut telah mengikuti tren alat mesin lainnya, dan mesin bubut NC sekarang dapat dibeli secara mudah. Proses pembentukan *chip* utama tercantum di bawah ini, dengan versi alternatif dalam tanda kurung. Setiap proses adalah dilakukan pada satu atau lebih peralatan mesin dasar. Misalnya, pengeboran dapat dilakukan pada mesin bor, penggilingan mesin, mesin bubut, dan beberapa mesin diantaranya:

- *Turning (boring, facing, cutoff, taper turning, form cutting, chamfering, recessing, thread cutting).*
- *Shaping (planing, vertical shaping)*

- *Milling (hobbing, generating, thread milling)*
- *Drilling (reaming, tapping, spot facing, counterboring, countersinking)*
- *Sawing (filing)*
- *Abrasive machining (grinding, honing, lapping)*

Baja atau besi tempa sebagai bahan produk yang akan dibentuk melalui proses pemesinan biasanya memiliki bentuk profil berupa bentuk dan ukuran yang telah distandarkan misalnya, bentuk bulat “O”, segi empat, segi enam “L”, “I” “H” dan lain lain.

Proses pemesinan dengan menggunakan prinsip pemotongan logam dibagi dalam tiga kelompok dasar, yaitu: proses pemotongan dengan mesin press, proses pemotongan konvensional dengan mesin perkakas, dan proses pemotongan non konvensional. Proses pemotongan dengan menggunakan mesin pres meliputi pengguntingan (*shearing*), pengepresan (*pressing*) dan penarikan (*drawing elongating*). Proses pemotongan konvensional dengan mesin perkakas meliputi proses bubut (*turning*), proses frais (*milling*), sekrap (*shaping*). Proses pemotongan logam ini biasanya dinamakan proses pemesinan, yang dilakukan dengan cara membuang bagian benda kerja yang tidak digunakan menjadi beram (*chips*) sehingga terbentuk benda kerja. Proses pemesinan adalah proses yang paling banyak dilakukan untuk menghasilkan suatu produk jadi yang berbahan baku logam. Diperkirakan sekitar 60% sampai 80% dari seluruh proses pembuatan suatu mesin yang komplit dilakukan dengan proses pemesinan.

Berikut ini adalah klasifikasi proses permesinan yaitu:

1. Berdasarkan Gerak Relatif Pahat

Pahat yang bergerak relatif terhadap benda kerja akan menghasilkan geram dan sementara itu permukaan benda kerja secara bertahap akan terbentuk menjadi komponen yang dikehendaki. Gerak relatif pahat terhadap benda kerja dapat dipisahkan menjadi dua komponen gerakan yaitu:

- Gerak potong (*cutting movement*), Dimana gerak potong adalah gerak yang menghasilkan permukaan baru pada benda kerja.

- Gerak makan (*gerak makan*ing movement), Gerak makan adalah gerak yang menyelesaikan permukaan baru yang telah di potong oleh gerak potong.

2. Berdasarkan Jumlah Mata Pahat yang digunakan

Pahat yang dipasangkan pada suatu jenis mesin perkakas memiliki mata pahat yang berbeda-beda. Jenis pahat/perkakas potong disesuaikan dengan cara pemotongan dan bentuk akhir dari produk. Adapun pahat dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis pahat yaitu pahat bermata potong tunggal (*single point cutting tools*) dan pahat bermata potong jamak (*multiple point cuttings tools*).

3. Berdasarkan Orientasi Permukaan

Selain ditinjau dari segi orientasi permukaan maka poses pemesinan dapat diklasifikasikan berdasarkan proses terbentuknya permukaan (proses generasi permukaan; *surface generation*). Dalam hal ini proses tersebut dikelompokkan dalam dua garis besar proses yaitu:

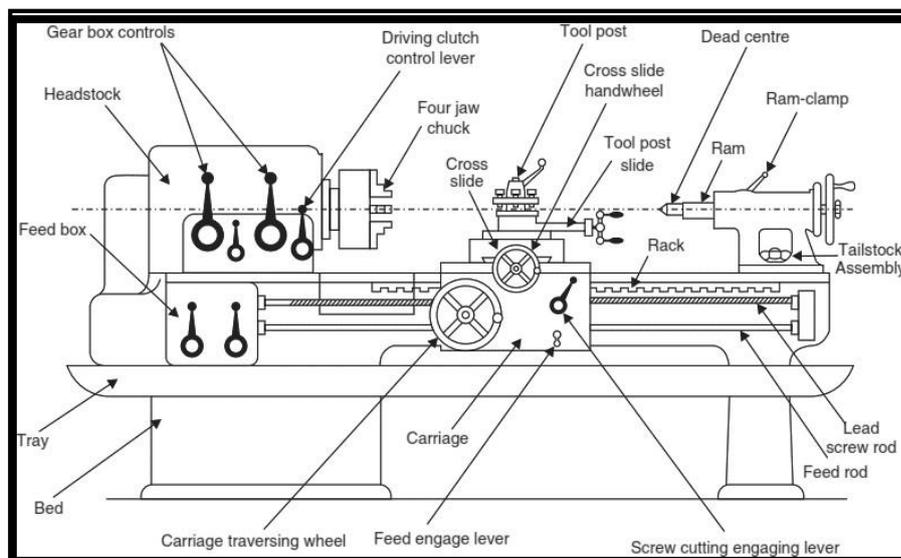
- Generasi permukaan silindrik atau konis dan
- Generasi permukaan rata/lurus dengan atau tanpa putaran benda kerja

4. Berdasarkan Mesin yang Digunakan

Dalam proses pemesinan jika kita ingin melakukan suatu pekerjaan, maka perlu kita ketahui terlebih dahulu dengan mesin apa yang semestinya kita gunakan sehingga produk yang kita buat sesuai dengan yang diinginkan. Beberapa jenis proses mungkin dapat dilakukan pada satu mesin perkakas. Misalnya, mesin bubut tidak selalu digunakan sebagai untuk membubut saja melainkan dapat pula digunakan untuk menggurdi, memotong dan melebarkan lubang (*boring*) dengan cara mengganti pahat dengan yang sesuai. Bahkan dapat digunakan untuk mengefreis, menggerinda atau mengasah halus asalkan pada mesin bubut yang bersangkutan dapat dipasangkan peralatan tambahan (*attachments*) yang khusus. (Kencanawati, 2017)

2.2. Mesin Bubut

Mesin bubut (*turning machine*) adalah suatu jenis mesin perkakas yang dalam proses kerjanya bergerak memutar benda kerja dan menggunakan pahat potong (*cutting tools*) sebagai alat untuk memotong benda kerja tersebut. Mesin bubut merupakan salah satu mesin proses produksi yang dipakai untuk membentuk benda kerja yang berbentuk silindris, namun dapat juga dipakai untuk beberapa kepentingan lain. Pada prosesnya benda kerja terlebih dahulu dipasang pada *chuck* (pencekam) yang terpasang pada spindel mesin, kemudian *spindel* dan benda kerja diputar dengan kecepatan tertentu. Alat potong (pahat) yang dipakai untuk membentuk benda kerja akan ditempelkan pada benda kerja yang berputar sehingga benda kerja terbentuk sesuai dengan ukuran yang dikehendaki. Umumnya pahat bubut dalam keadaan diam, pada perkembangannya ada jenis mesin bubut yang berputar alat potongnya, sedangkan benda kerjanya diam.



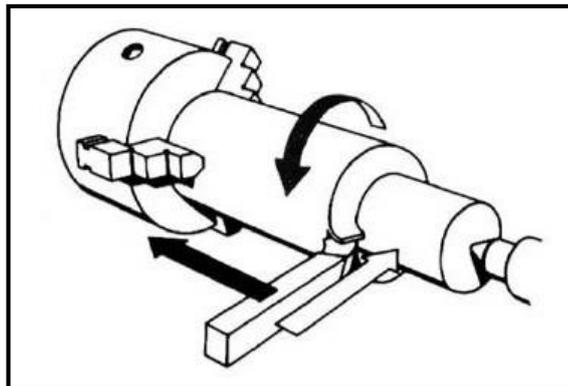
Gambar 2.1 Komponen Mesin Bubut

Sumber: (Gupta, et al., 2009)

Pada kelompok mesin bubut juga terdapat bagian-bagian otomatis dalam pergerakannya bahkan juga ada yang dilengkapi dengan layanan sistem otomatis, baik yang dilayani dengan sistem hidraulik ataupun elektrik. Ukuran mesinnya pun tidak semata-mata kecil karena tidak sedikit mesin bubut konvensional yang dipergunakan untuk mengerjakan pekerjaan besar seperti yang dipergunakan pada

industri perkapalan dalam membuat atau merawat poros baling-baling kapal yang diameternya mencapai 1.000 mm atau lebih. (Azhar, 2014)

Pergerakan memanjang dari pahat sepanjang luncuran (*sliding*) menghasilkan suatu permukaan yang bundar, dan pergerakan melintang untuk “*surfacing*” (atau *facing*) menghasilkan suatu permukaan yang rata. Gerak putar dari benda kerja disebut gerak potong relatif dan gerakan translasi dari pahat disebut gerak umpan (*gerak makan*). Bila gerak umpan lebih lambat dibandingkan dengan gerak potongnya akan dihasilkan benda kerja berbentuk silindrik dengan alur spiral yang hampir tidak kelihatan, dapat dikatakan, permukaan benda kerja tersebut halus. Bila gerak umpannya secara translasi dipercepat dan gerak potongnya diperlambat maka bentuk alur spiral yang mengelilingi benda kerja silindrik tersebut semakin jelas atau permukaan benda kerja kasar. (Upara, 2009)



Gambar 2.2. Gerakan Pada Proses Pembubutan

Sumber: Handout Permesinan Bubut (Nurdjito dan Arifin, 2015)

Mesin bubut merupakan salah satu metal cutting machine dengan gerak utama berputar, tempat benda kerja dicekam dan berputar pada sumbunya, sedangkan alat potong (*cutting tool*) bergerak memotong sepanjang benda kerja, sehingga akan terbentuk geram. Prinsip kerja mesin bubut adalah:

1. Benda kerja berputar pada sumbunya
2. Gerakan alat potong:
 - a. Alat potong bergerak sejajar sumbu utama disebut pembubutan memanjang.
 - b. Alat potong bergerak tegak lurus terhadap sumbu utama disebut pembubutan permukaan.

- c. Alat potong bergerak bersudut terhadap sumbu utama disebut pembubutan konis atau pembubutan tirus. (Nurdjito dan Arifin, 2015)

2.3. Bagian-bagian Mesin Bubut

2.3.1 Kepala tetap (*Headstock*)

Kepala tetap (*Headstock*), adalah bagian dari mesin bubut yang merupakan tempat dari komponen-komponen utama penggerak dari sumbu utama (*main spindle*) yang berfungsi sebagai tempat dudukan pencekam (*Chuck*), plat pembawa, kolet, senter, pada sebuah sumbu utama (*Main spindle*) terpasang sebuah pencekam. Thermoelectric Cooler (*Chuck*), di dalam box transmisi (*Gearbox Transmission*) terdapat susunan roda gigi yang dapat digeser-geser melalui tuas (*Handle*) berfungsi dapat mengoperasikan mesin sesuai dengan kebutuhan pembubut.

2.3.2 Meja Mesin (*Bed*)

Meja mesin bubut juga berfungsi tempat dari dudukan kepala lepas, eretan lepas, penyangga diam (*Steady rest*) dan merupakan tumpuan dari gaya pemakanan saat pembubutan bentuk dari alas bermacam-macam, ada yang datar Permukaanya halus dan rata, sehingga gerakan dari kepala lepas bergerak lancar.

2.3.3 Eretan (*Carriage*)

Eretan (*Carriage*), adalah bagian dari komponen mesin yang digunakan untuk penyetelan dari posisi pahat HSS pada arah memanjang, ke kanan dan kiri baik secara manual dan otomatis. Eretan tersebut terdiri dari, yaitu :

- 1) Eretan memanjang

Eretan memanjang digunakan untuk bisa mengerakkan atau menyetel pahat kearah sumbu memanjang pada saat mesin beroperasi atau mesin dalam keadaan mati.

- 2) Eretan melintang (*Cross carriage*)

Eretan melintang ditempatkan memanjang fungsinya agar dapat mengatur posisi pahat posisi pahat pada saat proses pembubutan sehingga dapat diatur mendekati atau menjauhi operator.

3) Eretan atas (*Top carriage*)

Eretan atas antara eretan melintang dan eratan atas juga dipasang support yang juga dilengkapi dengan skala serajat, juga berfungsi sebagai dudukan penjepit (*toolpost*) mata pahat pada mesin bubut.

2.3.4 Kepala lepas (*Tail stock*)

Kepala Lepas merupakan bagian utama dari mesin bubut yang berfungsi sebagai penopang dalam membubut benda kerja yang panjang, agar benda kerja tetap berputar pada sumbunya, meletakkan mata bor, dan tap.

2.3.5 Penjepit pahat (*Toolpost*)

Penjepit pahat (*Toolpost*) digunakan untuk menjepit atau memasag pahat, maka bisa menambahkan lempengan plat besi, agar posisi ujung pahat tingginya dapat satu sumbu (*senter*) dengan kepala lepas.

2.3.6 Pencekam (*Chuck*)

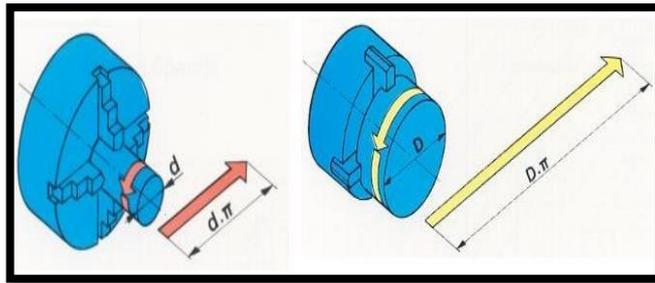
Pencekam (*Chuck*), berfungsi digunakan untuk menjepit benda kerja pada mesin bubut. Jenis cekamnya ada yang berahang 3 (tiga) sepusat (*Self centering chuck*) dan ada juga yang berahang 3 (tiga) dan 4 (empat) tidak sepusat.

2.3.7 Kran pendingin

Kran pendingin berfungsi untuk menyalurkan cairan pendingin (*bromus*) saat proses pembubutan. Pemberian cairan pendingin berfungsi untuk mendinginkan benda kerja baja karbon menengah AISI 1045 (HQ760) dan pahat potong HSS pada saat terjadinya proses pembubutan sehingga pahat tidak mudah aus.

2.4. Variabel Permesinan

Ada 3 (tiga) parameter utama pada setiap proses bubut yaitu kecepatan putar spindel (*speed*), gerak makan (*feed*) dan kedalaman potong (*Depth of cut*). Faktor yang lain seperti bahan benda kerja dan jenis pahat sebenarnya juga memiliki pengaruh yang cukup besar, tetapi tiga parameter di atas adalah bagian yang bisa diatur oleh operator langsung pada mesin bubut.

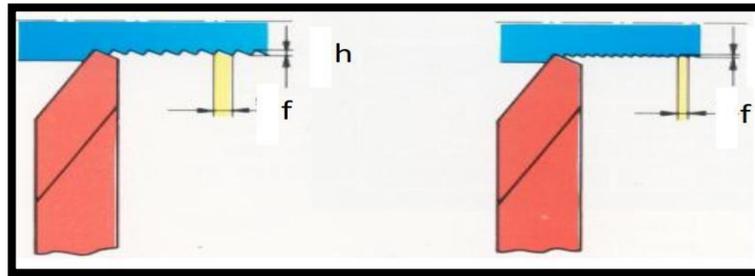


Gambar 2.3. Panjang permukaan benda kerja

Sumber : Handout Permesinan Bubut (Nurdjito dan Arifin, 2015)

Kecepatan putar, n (*speed*), selalu dihubungkan dengan spindel (sumbu utama) dan benda kerja. Karena kecepatan putar diekspresikan sebagai putaran per menit (*revolutions per minute*, rpm), hal ini menggambarkan kecepatan putarannya. Akan tetapi yang diutamakan dalam proses bubut adalah Kecepatan spindel (*Cutting speed* atau V) atau kecepatan benda kerja dilalui oleh pahat/ keliling benda kerja (gambar 2.3).

Dengan demikian Kecepatan spindel ditentukan oleh diameter benda kerja. Selain Kecepatan spindel ditentukan oleh diameter benda kerja faktor bahan benda kerja dan bahan pahat sangat menentukan harga Kecepatan spindel. Pada dasarnya pada waktu proses bubut Kecepatan spindel ditentukan berdasarkan bahan benda kerja dan pahat. Harga Kecepatan spindel sudah tertentu tergantung jenis bahan/benda kerja, jenis alat potong, dan kekasaran pemakanan pahat bubut. Misalnya untuk benda kerja *Mild Steel* dengan pahat dari HSS, Kecepatan spindelnya antara 20 sampai 30 m/menit.



Gambar 2.4. Gerak makan (f) dan kedalaman pemotongan (h)

Sumber : Handout Permesinan Bubut (Nurdjito dan Arifin, 2015)

Gerak makan, f (*gerak makan*), adalah jarak yang ditempuh oleh pahat setiap benda kerja berputar satu kali (gambar 2.4), sehingga satuan f adalah mm/putaran. Gerak makan ditentukan berdasarkan kekuatan mesin, material benda kerja, material pahat, bentuk pahat, dan terutama kehalusan permukaan yang diinginkan. Gerak makan biasanya ditentukan dalam hubungannya dengan kedalaman potong a . Gerak makan tersebut berharga sekitar $1/3$ sampai $1/20$ h , atau sesuai dengan kehalusan permukaan yang dikehendaki.

Kedalaman potong, a (*kedalaman potong*), adalah tebal bagian benda kerja yang dibuang dari benda kerja, atau jarak antara permukaan yang dipotong terhadap permukaan yang belum terpotong (gambar 2.4). Ketika pahat memotong sedalam a , maka diameter benda kerja akan berkurang $2h$, karena bagian permukaan benda kerja yang dipotong ada di dua sisi, akibat dari benda kerja yang berputar. (Nurdjito dan Arifin, 2015)

Bagi suatu tingkat proses, ukuran produk terlebih dahulu ditentukan dan kemudian pahat harus membuang sebagian material benda kerja sampai ukuran benda kerja tercapai. Hal ini tidak terlepas dari elemen dasar proses pemesinan.

Elemen dasar dapat dihitung dengan rumus-rumus berikut ini:

Kecepatan spindel

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} ; m/min \quad (2.1)$$

Dimana:

$$d = \text{diameter rata-rata} \\ = (d_o + d_m) / 2, \text{ mm} \quad (2.2)$$

Kecepatan makan

$$V_f = f \cdot n, \text{ mm/min} \quad (2.3)$$

Dimana:

f = gerak makan, mm/put

n = putaran spindel, rpm

Tabel 2.1. Variabel pemrosesan yang direkomendasikan pada proses pembubutan.

Workpiece material	Cutting tool	Range for roughing and finishing		
		Kedalaman potong, mm	Gerak makan, mm/rev	Cutting Speed, m/min
Low carbon and free machining Steel	Uncoated carbide	0,5-7,6	0,15-1,1	60-135
	Ceramic-coated carbide	“	“	180-495
	Triple coated carbide	“	“	90-245
	Tin coated carbide	“	“	60-230
	Al ₂ O ₃ ceramic	“	“	365-550
Medium and High carbon Steel	Uncoated carbide	2,5-7,6	0,15-0,75	135-225
	Ceramic-coated carbide	“	“	120-210
	Triple coated carbide	“	“	75-215
	Tin coated carbide	“	“	45-215
	Al ₂ O ₃ ceramic	“	“	245-455

Sumber: (Kalpakjian & Schmid,2014)

Secara sederhana variabel pemrosesan merupakan segala variabel yang mempengaruhi proses maupun hasil pemrosesan. Variabel pemrosesan ini terdiri atas variabel yang bergantung pada mesin dan variabel yang bergantung pada benda kerja. Adapun variabel pemrosesan yang dimaksud adalah sebagai berikut.

1. Benda kerja:

d_o = diameter mula (mm)

d_f = diameter akhir (mm)

l_t = panjang pemotongan (mm)

a = kedalaman pemotongan (mm)

2. Mesin:

f = gerak makan (mm/putaran)

n = putaran poros utama (rpm)

2.5. Pahat Bubut

Kualitas benda kerja dan efisiensi kerjanya akan tergantung dari pahat yang digunakan. Pahat memiliki arti proses memotong (*cutting process*), yaitu memotong logam untuk mendapatkan bentuk dan ukuran, serta kualitas permukaan potong yang direncanakan. Setiap pekerjaan diperlukan pahat yang tepat, misalnya untuk pekerjaan kasar (*roughing*), halus (*finishing*), permukaan (*facing*), bor, ulir dan lain-lain, diperlukan pahat yang khusus untuk tujuan masing-masing. (Upara, 2009)

Kekerasan dan tahan terhadap gesekan yang rendah tidak diinginkan pada material pahat, sebab akan menyebabkan keausan pada material pahat tersebut. Keuletan yang rendah dan ketahanan thermal yang rendah akan mengakibatkan rusaknya pahat terhadap mata potong maupun retak mikro pada pahat yang mengakibatkan kerusakan fatal pada pahat dan benda kerja. Sifat-sifat unggul diatas memang perlu dimiliki oleh material pahat. Akan tetapi tidak semua sifat tersebut dapat dipenuhi secara berimbang. Pada umumnya kekerasan, ketahanan gesek dan ketahanan thermal yang tinggi selalu diikuti oleh penurunan keuletan. Berbagai penelitian dilakukan untuk mempertinggi kekerasan dan menjaga supaya keuletan tidak terlalu rendah sehingga pahat tersebut dapat digunakan pada Kecepatan spindel yang tinggi.

Pada mulanya untuk memotong baja digunakan baja karbon tinggi sebagai bahan dari pahat, dimana Kecepatan spindelnya pada waktu itu hanya bisa mencapai sekitar 10 m/menit. Berkat kemajuan teknologi Kecepatan spindel ini dapat dinaikkan sehingga mencapai sekitar 700 m/menit yaitu dengan

menggunakan CBN (*Cubic Baron Nitride*). Kekerasan tersebut dapat dicapai berkat kekerasan yang tetap relatif tinggi meskipun temperatur kerjanya cukup tinggi. Dari kemajuan teknologi tersebut dapat diketahui bahwa hanya material dari jenis karbida dan keramiklah yang tetap berfungsi dengan baik pada Kecepatan spindel atau temperatur kerja yang tinggi. Meskipun demikian, bukan berarti hanya Karbida dan Keramik saja yang saat ini di pakai sebagai pahat potong tetapi jenis lain masih tetap dipilih yaitu pada saat di perlukan sifat keuletan yang dan nilai ekonomis yang tinggi. Namun pada saat ini material pahat yang banyak digunakan adalah HSS dan Karbida. Berikut ini adalah material-material pahat secara berurutan dari yang paling lunak tetapi ulet sampai dengan yang paling keras tetapi getas, yaitu: i) Baja Karbon Tinggi, ii) HSS (*High Speed Steels*), iii) Paduan *Cor Nonferro*, iv) Karbida, v) CBN (*Cubic Baron Nitride*). (Azhar, 2014)

2.6. Pahat HSS

Pahat bubut merupakan alat potong yang digunakan untuk memotong atau menyayat benda kerja yang dikerjakan pada mesin bubut. Pahat bubut dipasang di dalam rumah pahat pada mesin bubut. Pahat bubut dibedakan menjadi 2 jenis material, yaitu material HSS (*High Speed Steel*) dan material carbide. (Patriadicka, 2021)

Pahat Bubut HSS Sebagian besar pahat potong yang terbuat dari baja termasuk dalam kategori baja kecepatan tinggi atau HSS (*High Speed Steel*). Dua kelompok utama dari kategori ini adalah *molibden* (M1, M2 dan seterusnya, biasanya dengan 0,8% C, 4% Cr, 5-8% Mo, 0,6% W dan 1-2% V) dan jenis *tungsten* (seperti T1, dengan 0,7C-4Cr-18W-1V). (A. Schey John, 2000)

2.7. Baja AISI 1037

American Iron Steel Institute (AISI) di dunia industri, terdapat banyak sekali jenis baja, maka terdapat kode-kode untuk mengelompokkan jenis baja. Misalnya adalah baja konstruksi yang biasanya kekuatan merupakan faktor yang paling penting, penamaannya berdasarkan kekuatan tariknya. Pada standarisasi Jerman (DIN), baja konstruksi dinyatakan dengan huruf ST kemudian diikuti dengan angka yang menunjukkan kekuatan tarik minimum dari baja, kode St 37 adalah baja

berkekuatan tarik paling tidak 37 kg/mm². Baja ST37 merupakan baja konstruksi dengan kekuatan tarik sebesar 37 kg/mm². Untuk baja ST37 digolongkan kadar karbon rendah (hypoeutectoid) setelah diteliti didapatkan nilai karbon ST37 (0,468 - 0,574%) baja tersebut sudah cukup ideal bila digunakan untuk alat-alat perkakas. Baja karbon rendah (ST 37) memiliki kandungan karbon kurang dari 0,3 %. Baja ini sering dipakai juga untuk konstruksi-konstruksi mesin yang saling bergesekan seperti roda gigi, poros, dll karena sangat ulet.

2.9. Metode *Taguchi*

Dr. Genichi Taguchi (1940) memperkenalkan metode *Taguchi* yang merupakan metodologi baru dalam bidang teknik dengan tujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses, serta bertujuan menekan biaya dan *resources* seminimal mungkin. Soejanto (2009) menyatakan bahwa metode *Taguchi* menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan (*noise*). Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat robust terhadap faktor-faktor gangguan tersebut, sehingga disebut sebagai *robust design*.

Metode *Taguchi* memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya. Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain (Soejanto, 2009):

1. Lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan robust terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Oleh karena metode *Taguchi* memiliki struktur rancangan yang sangat kompleks, maka metode ini juga memiliki rancangan yang mengorbankan pengaruh interaksi yang cukup signifikan. Untuk mengatasi hal tersebut, pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Desain eksperimen dengan menggunakan metode *Taguchi* dibagi menjadi tiga tahap utama yang mencakup semua pendekatan eksperimen, yaitu sebagai berikut:

2.9.1 Tahap Perencanaan

Tahap ini terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut.

- a. Perumusan Masalah harus dirumuskan secara spesifik. Perumusan masalah harus jelas secara teknis sehingga dapat dituangkan ke dalam eksperimen yang akan dilakukan.
- b. Penentuan Tujuan Eksperimen Tujuan eksperimen yang ditentukan harus dapat menjawab masalah yang telah dirumuskan.
- c. Penentuan Respon memiliki nilai yang tergantung pada faktor-faktor lain yang disebut variabel bebas.
- d. Pengidentifikasian Faktor/Variabel Bebas Faktor adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain. Pada langkah ini akan dipilih faktor-faktor yang akan diselidiki pengaruhnya terhadap respon yang bersangkutan. Dalam suatu eksperimen, tidak semua faktor yang diperkirakan mempengaruhi respon harus diselidiki. Dengan demikian, eksperimen dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien.
- e. Pemisahan Faktor Kontrol dan Faktor Gangguan Faktor-faktor yang diamati dapat dibagi menjadi faktor kontrol dan faktor gangguan. Dalam desain eksperimen *Taguchi*, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua faktor tersebut berbeda. Faktor kontrol adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan sedangkan faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan.
- f. Penentuan Jumlah dan Nilai Level Faktor Pemilihan jumlah level akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin banyak.
- g. Penentuan Matriks Ortogonal Matriks ortogonal merupakan matriks eksperimen yang memuat 28 beberapa faktor-faktor dan level-level dari

faktor tersebut. Matriks ini adalah matriks yang seimbang antara faktor dan level, sehingga pengaruh suatu faktor atau level tidak tercampur dengan pengaruh faktor atau level yang lain (Soejanto, 2009).

Dalam matriks ortogonal, elemen-elemennya disusun menurut baris dan kolom. Kolom pada matriks tersebut berisi faktor-faktor atau kondisi-kondisi yang dapat diubah dalam eksperimen. Baris berisikan keadaan (level) dari faktor yang terdapat pada kolom. Matriks disebut ortogonal karena level-level dari faktor-faktor berimbang jumlahnya.

Penggunaan matriks ortogonal bertujuan untuk mengefisienkan dan meminimalkan biaya eksperimen serta memperhatikan faktor gangguan (sehingga disebut *Robust Design*). Hal ini sangat bermanfaat dalam penelitian khususnya penelitian industri, karena dalam penelitian tersebut banyak faktor yang saling berpengaruh dan berinteraksi, serta adanya faktor gangguan yang sangat mahal untuk dikendalikan.

Penentuan matriks ortogonal digunakan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan untuk menyelidiki faktor yang diamati. Matriks ortogonal yang tepat dapat ditentukan apabila jumlah derajat kebebasan eksperimen telah dihitung. Derajat kebebasan dapat didefinisikan sebagai jumlah perbandingan antara faktor atau parameter yang dibuat untuk menentukan level mana yang lebih baik dan seberapa jauh parameter tersebut lebih baik (Lin, 2002).

Jadi langkah awal dalam penentuan matriks ortogonal adalah penentuan jumlah faktor dan levelnya agar jumlah derajat kebebasan dapat ditentukan. Derajat kebebasan dari matriks ortogonal (ν_{mo}) dapat ditentukan dengan menjumlahkan derajat kebebasan dari faktor dan level (ν_{fl}).

Derajat kebebasan dari faktor dan level (ν_{fl}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\nu_{fl} = \text{Jumlah level faktor} - 1 \quad (2.4)$$

Jumlah eksperimen minimal yang digunakan untuk penentuan matriks ortogonal didapatkan dari persamaan berikut:

$$\text{Jumlah eksperimen (n)} = \nu_{mo} + 1 \quad (2.5)$$

Jenis matriks ortogonal yang tersedia secara standar dapat dilihat pada Tabel 2.5. Matriks ortogonal L4 (23) berarti jumlah eksperimen yang dilakukan adalah empat, jumlah derajat kebebasan dari matriks ortogonal (ν_{mo}) maksimal adalah tiga, serta matriks tersebut dapat digunakan untuk jumlah faktor maksimal 3 dengan masing-masing memiliki 2 level.

Tabel 2.2 Matriks Ortogonal

2 Level	3 Level	4 Level	5 Level	Level Gabungan
L4 (2^3)	L9 (3^4)	L16 (4^3)	L25 (5^6)	L18 ($2^1 \times 3^7$)
L8 (2^7)	L27 (3^{13})	L64 (4^{21})		L32 ($2^1 \times 4^9$)
L12 (2^{11})	L81 (3^{40})			L36 ($2^{11} \times 3^{12}$)
L16 (2^{13})				L36 ($2^3 \times 3^{13}$)
L32 (2^{31})				L54 ($2^1 \times 3^{25}$)
L54 (2^{63})				L50 ($2^1 \times 5^{11}$)

Sumber: (Soejanto, 2009)

2.9.2 Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan terdiri dari 2 hal, yaitu penentuan jumlah replikasi dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.

- a. Jumlah Replikasi Replikasi adalah pengulangan kembali perlakuan yang sama pada kondisi yang sama dalam sebuah percobaan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi, mengurangi tingkat kesalahan serta memperoleh harga taksiran dari kesalahan.
- b. Randomisasi Pengaruh faktor-faktor lain yang tidak diinginkan atau tidak dapat dikendalikan selalu ada dalam sebuah eksperimen. Pengaruh itu dapat diperkecil dengan menyebarkan faktor-faktor tersebut melalui randomisasi (pengacakan) urutan percobaan. Randomisasi dilakukan bertujuan untuk menyebarkan pengaruh dari faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada semua unit eksperimen serta memberikan kesempatan yang sama pada semua unit eksperimen untuk menerima suatu perlakuan sehingga ada kehomogenan pengaruh dari setiap perlakuan yang sama. Selain itu, randomisasi juga bertujuan mendapatkan hasil eksperimen yang bebas satu sama lain. Jika replikasi bertujuan untuk memungkinkan dilakukannya uji signifikansi, maka

randomisasi bertujuan untuk memberikan validasi terhadap uji signifikansi tersebut dengan menghilangkan sifat bias.

2.9.3 Tahap Analisis

Pada tahap ini, pengolahan data dilakukan. Selain itu, juga dilakukan perhitungan dan pengujian data statistik pada data hasil eksperimen. Analisis Variasi (ANOVA) digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam desain secara statistik. Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variasi atas bagian-bagian yang diteliti. ANOVA pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANOVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (db), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS) dan kuadrat tengah (*mean of square*, MS) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.6

Tabel 2.3 Tabel Analisis Variansi (ANAVA)

Sumber Variansi	db	SS	MS
Faktor A	v_A	SSA	MSA
Faktor B	v_B	SSB	MSB
Faktor C	v_C	SSC	MSC
Faktor D	v_D	SSD	MSD
Faktor E	v_E	SSE	MSE
Faktor F	v_F	SSF	MSF
Error	v_{error}	SSerror	MSerror
Total	v_T	SST	

Sumber : (Soejanto, 2009)

Dimana:

$$\begin{aligned} v_T &= \text{derajat bebas total} \\ &= N - 1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} v_A &= \text{derajat bebas faktor A} \\ &= k_A - 1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} v_B &= \text{derajat bebas faktor B} \\ &= k_B - 1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \nu_C &= \text{derajat bebas faktor C} \\ &= k_C - 1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \nu_{\text{error}} &= \text{derajat bebas error} \\ &= \nu_T - \nu_A - \nu_B - \nu_C - \nu_D - \nu_E - \nu_F \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} T &= \text{jumlah keseluruhan} \\ &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} CF &= \text{faktor koreksi} \\ &= \frac{T^2}{N} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= \text{jumlah kuadrat total} \\ &= \sum_{i=1}^n y_i^2 - CF \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$= \sum_{i=1}^n (y_i - T)^2 \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} SS_A &= \text{jumlah kuadrat faktor A} \\ &= [\sum_{i=0}^{k_A} \binom{A_1^2}{n_{A_1}}] - CF \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} SS_B &= \text{jumlah kuadrat faktor B} \\ &= [\sum_{i=0}^{k_B} \binom{B_1^2}{n_{B_1}}] - CF \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} SS_C &= \text{jumlah kuadrat faktor C} \\ &= [\sum_{i=0}^{k_C} \binom{C_1^2}{n_{C_1}}] - CF \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} SS_E &= \text{jumlah kuadrat error} \\ &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_E - SS_F \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} MS_A &= \text{kuadrat tengah faktor A} \\ &= SS_A - \nu_A \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} MS_B &= \text{kuadrat tengah faktor B} \\ &= SS_B - \nu_B \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} MS_C &= \text{kuadrat tengah faktor C} \\ &= SS_C - \nu_C \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} MS_E &= \text{kuadrat tengah faktor error} \\ &= SS_E - \nu_E \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.9.4 Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal to Noise Ratio*) digunakan untuk memilih nilai level faktor terbesar untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Penggunaan Rasio S/N dilakukan untuk meminimalkan karakteristik kualitas terhadap faktor gangguan. Perhitungan rasio S/N tergantung dari jenis karakteristik kualitas, yaitu: (Soejanto, 2009)

1. Semakin kecil semakin baik adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non-negatif sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = - 10 \log\left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}\right] \quad (2.23)$$

2. Tertuju pada nilai tertentu adalah karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = - 10 \log\left[\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n}\right] \quad (2.24)$$

Semakin besar semakin baik adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non-negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. Rasio S/N untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S/N = - 10 \log\left[\sum_{i=1}^n \frac{1/y_i^2}{n}\right] \quad (2.25)$$