

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1. *Squeeze Casting*

Pengecoran *Squeeze* atau yang sering juga disebut penempaan logam cair adalah proses dimana logam cair didinginkan dalam cetakan tertutup yang diberi tekanan dari luar yang berasal dari tenaga hidrolik dengan variasi pengecoran yang berbeda-beda (Sri Mulyo Bondan Respati, 2016). Untuk memperoleh produk cor yang memenuhi syarat-syarat ideal bagi suatu *sound-cast*, ada beberapa variabel yang perlu diperhatikan, yaitu :

a. Durasi Penekanan (*Pressure Duration*)

Durasi penekanan dihitung dari saat punch di titik terendah sampai saat punch diangkat (penekanan dilepaskan). Untuk benda cor dengan berat hingga 9 kg, durasi penekanan yang sering dipakai bervariasi antara 30 – 120 detik. Akan tetapi biasanya durasi ini juga tergantung pada bentuk geometri coran yang diinginkan. Untuk material komposit pemberian tekanan setelah pembekuan (*solidification*) tidak memperbaiki sifat, tetapi hanya menambah waktu siklus saja.

b. Volume Cairan (*Melt Volume*)

Diperlukan kontrol yang akurat ketika logam cair dituangkan ke dalam rongga cetak (*die cavity*). Pada hasil produk coran, laju pembekuan yang sedang tidak terbentuknya porositas serta parikel si, sedangkan pada pembekuan yang cepat tidak ditemukan porositas tetapi terbentuknya partikel Si disertai Al dendrit yang lembut.

c. Temperatur Tuang (*Casting Temperature*)

Temperatur tuang diukur dari proses penuangan pertama di mulut cetakan. Temperatur ini berpengaruh terhadap jenis paduan dan bentuk coran/komponen. Untuk benda cor dengan tekanan 25 MPa, temperatur cetakan 250°C, temperatur yang di pakai bervariasi antara 660°C – 750°C di atas temperatur *liquidus*.

d. Temperatur Perkakas (*Casting Temperatur*)

Temperatur normal adalah 190 – 315⁰C. Untuk produk cor yang mempunyai penampang relatif tebal, rentang temperatur ini dapat diturunkan. Biasanya temperatur punch diatur 15 – 30⁰C dibawah temperatur die terendah untuk memungkinkan adanya kelonggaran atau ventilasi yang memadai diantara keduanya. Kelonggaran yang berlebihan antara punch dan die mengakibatkan erosi pada permukaan keduanya.

Untuk produk cor yang mempunyai penampilan relatif tebal, rentang temperatur ini dapat diturunkan. Biasanya temperatur *die* dan *punch* dengan variasi 220°C - 330°C menggunakan sprayer kemudian ditahan 10 menit supaya temperaturnya merata di seluruh *die*.

e. Waktu Tunggu (*Time Delay*)

Waktu tunggu / Waktu tuang adalah lamanya waktu yang diukur dari saat pertama penuangan logam cair ke dalam rongga cetak hingga saat permukaan *punch* menyentuh dan mulai menekan permukaan logam cair. Bentuk penampang yang kompleks memerlukan waktu yang cukup bagi logam cair mengisi keseluruhan rongga cetakan; untuk itu perlu adanya tenggang waktu yang cukup sebelum *punch* menyentuh dan menekan logam cair. Hal ini untuk menghindari terjadinya porositas akibat penyusutan (*shrinkage porosity*).

f. Batas Tekanan (*Pressure Level*)

Rentang tekanan normal adalah 50 – 140 MPa, tergantung pada bentuk geometri komponen serta sifat mekanis yang dibutuhkan. Tetapi dimungkinkan tekanan minimum adalah 40 MPa. Tekanan yang sering digunakan 70 MPa. Beban penekanan didapat dari pada saat cairan telah dimasukkan kedalam cetakan. Kemudian ditekan agar mendapatkan produk coran yang padat. Bentuk coran dengan temperatur cairan 850°C kemudian di tekan dengan variasi 10 - 30 Mpa.

g. Pelumasan (*Lubrication*).

Proses squeeze casting membutuhkan pelumas pada permukaan dies untuk memudahkan proses pengambilan produk cor dari cetakkannya. Akan tetapi sistem pelumasan ini diusahakan jangan sampai menutupi lubang ventilasi yang ada pada dies. Untuk paduan aluminium, magnesium, dan tembaga, permukaan dies biasanya disemprot dengan pelumas colloidal graphite. Sedangkan ferrous casting, permukaan dies biasanya dilapisi dengan sejenis bahan keramik untuk mencegah efek pengelasan antara produk cor dengan permukaan dies.

h. Kecepatan Pengisian (*Filling rate*)

Makin rendah kecepatan pengisian akan menyebabkan makin tingginya kemungkinan untuk mendapatkan aliran *laminar*. Akan tetapi kecepatan pengisian yang terlalu rendah dapat menyebabkan kehilangan panas (*heat loss*) yang besar dan berakibat pada terjadinya premature *solidification* serta *cold shuts*. Oleh karena itu perlu ditentukan kecepatan

pengisian yang optimal, sehingga aliran pengisian menjadi *laminar* dan tidak terjadi *turbulensi*. Kecepatan pengisian 2 cm/s -16 cm/s.

2.2. Pengaruh Volume Cairan (*Melt Volume*) Terhadap Perubahan Bentuk, Dimensi dan Kekasaran Permukaan

Volume cairan sangat berpengaruh pada hasil coran yang berhubungan dengan laju pembekuan coran. Diperlukan kontrol yang kuat untuk mengatur akurasi pada saat cairan logam dituangkan kedalam rongga cetak (*die cavity*). Penelitian menurut (S. Seifeddine, 2009) pengaruh laju pembekuan pada alumunium A380, berpengaruh pada hasil produk coran. Waktu laju pembekuan yang cepat membuat kekerasan material semakin tinggi akan tetapi keuletannya berkurang. Pada hasil produk coran, laju pembekuan yang sedang tidak terbentuknya porositas serta parikel si, sedangkan pada pembekuan yang cepat tidak ditemukan porositas tetapi terbentuknya partikel Si disertai Al dendrit yang lembut. Penelitian (LA. Dobrzanski, 2007) meneliti pengaruh perbedaan laju pembekuan pada saat melakukan proses pengecoran. Semakin cepat laju pembekuan akan meningkatkan sifat mekanik suatu bahan salah satunya kekerasannya, dibalik kekerasannya yang meningkat terdapat nilai keuletan yang menurun. Hal ini dibuktikan bahwa volume cairan sangat berpengaruh pada sifat mekanik hasil coran. ini berkaitan selama proses waktu pembekuan akan terjadi proses pembentukan struktur mikro, semakin cepat laju pembekuan akan meningkatkan sifat mekanik suatu bahan. Pada alumunium paduan, menurut (Adri, 2016) laju pembekuan sangat dipengaruhi oleh volume cairan, karena dengan waktu pembekuan yang panjang, kristal-kristal dendrit sempat tumbuh di sekeliling inti, dan pembekuan berakhir pada keadaan dendrit-dendrit tersebut saling bertemu dan menghasilkan butir-butir kristal yang besar. Menurut (Aspiyansyah, 2016) Sebuah produk coran yang mempunyai variasi temperatur tuang 650°C, 700°C, dan 750°C dan temperatur cetakan 100°C, 200°C, dan 300°C menunjukkan perubahan serpihan Mg yang semula tebal menjadi tipis dikarenakan terjadinya laju pembekuan, temperatur tuang dan waktu pembekuan. Semakin tinggi temperatur tuang maka yang dihasilkan serpihan Mg semakin tebal yang terdapat oksidasi dikarenakan gas lingkungan seperti oksigen dan hidrogen yang menjadikan serpihan Mg menjadi tipis, serta lambatnya pembekuan menyebabkan logam cair teroksidasi lebih banyak yang ditunjukkan dengan dominan semakin kecilnya serpihan yang dihasilkan pada

temperatur tuang yang tinggi. Pada temperatur 750°C dengan temperatur 200°C terjadi pengurangan serpihan garis tipis lebih dominan, berarti dengan adanya laju pembekuan dan waktu pembekuan yang cukup lama membuat magnesium lebih mudah teroksidasi yang membuat laju korosi semakin cepat. dengan penambahan Mg pada proses pengecoran membuat sifat mekanik suatu bahan semakin meningkat. Jumlah Mg yang berkurang mengakibatkan sifat reaksi oksidasi Mg cepat terjadi dan cepat menguap pada logam AlMg₂ mencapai titik lebur. Menurunnya unsur Mg dapat menurunkan kekuatan logam AlMg.

2.3. Pengaruh Temperatur Perkakas (*Casting Temperature*) Terhadap Perubahan Bentuk, Dimensi dan Kekasaran Permukaan

Menurut (P. Senthil, 2016) Kualitas hasil coran tergantung pada parameter yang digunakan, diantaranya durasi penekanan, beban penekanan dan suhu cetakan yang digunakan. Suhu cetakan di bawah 150°C menyebabkan prematuritas dalam coran dan suhu di atas 300°C menyebabkan peningkatan waktu pepadatan dan penurunan umur rakitan cetakan. Dengan menggunakan bahan komposit aluminium A356 + 5% SiC beban penekanan 120 MPa dengan suhu penuangan 610°C dan temperatur perkakas 300°C sifat mekanik hasil coran lebih baik dibandingkan dengan coran lainnya karena adanya penyempurnaan butir dan distribusi SiC dalam matriks aluminium. Dengan pengaruh temperatur cetakan yang diterapkan, tidak ada perbedaan panas yang terlalu signifikan antara inti coran dengan permukaan cetakan, ini membantu untuk meningkatkan laju transfer panas lokal di permukaan sehingga menghasilkan pembekuan yang seragam antara inti dan luar coran. Menurut (A. Mahamani, 2016) Permukaan yang halus ialah dari logam cair yang memiliki waktu pembekuan yang pendek, karena dengan waktu pembekuan yang pendek pada logam cair hanya tumbuh butir-butir kristal kecil. Permukaan yang kasar ialah dari logam cair yang memiliki waktu pembekuan yang panjang, karena dengan waktu pembekuan yang panjang, kristal-kristal dendrit sempat tumbuh di sekeliling inti, dan pembekuan berakhir pada keadaan dendrit-dendrit tersebut saling bertemu dan menghasilkan butir-butir kristal yang besar. Semakin banyak volume cairan, maka semakin meningkat pula nilai kekasaran permukaannya. Perubahan bentuk dan dimensi juga di pengaruhi oleh laju pembekuan.

Menurut (**Taufikurrahman dkk, 2013**) proses pengecoran *squeeze casting* akan menghasilkan produk akhir yang lebih akurat dengan kualitas yang baik dibandingkan dengan pengecoran dengan metode lainnya. Hasil pengecoran terlihat lebih padat dan lebih homogen serta memiliki sifat mekanik yang baik. dengan menggunakan bahan daur ulang 25 kg piston dan 25 kg roda dalam bentuk campuran (rem, penutup mesin dan perabot rumah tangga) yang telah di lebur di unit pengolahan. Proses pengecoran dilakukan dengan ditungkannya cairan ke dalam sebuah cetakan pada suhu 500° C kemudian diberi tekanan selama 60 hingga 70 detik. Proses tekanan diulang pada beban 50, 70, 90, 110 , 130 dan 150 MPa. Kemudian bahan tersebut dikeluarkan dari cetakan. Meningkatnya tingkat tekanan pada paduan aluminium di permukaan telah memberikan tekanan yang signifikan pada proses, ini dikarenakan karena kepadatan paduan elemen selama proses pembekuan. Semakin besar tekanan, kekerasan akan semakin meningkat. Namun, jumlah tekanan memiliki batas-batasnya untuk proses solidifikasi logam dan sifat dari logam cair. Dalam proses ini kekerasan meningkatkan hingga 22% yang dipengaruhi waktu penekanan, suhu dan beban penekan. *Squeeze casting* juga dikenal dengan penempaan logam cair, dimana logam cair memadat di bawah tekanan tertutup diposisikan antara pelat pers hidrolik. Dengan memvariasikan tekanan dan kontak instan dari logam cair dengan permukaan cetakan menghasilkan kondisi cepat transfer panas yang menghasilkan produk cor dengan sifat mekanik yang baik. Dengan menggunakan bahan aluminium 6061 dengan beban penekanan 35 MPa, 70 MPa dan 150 MPa, suhu cetakan 200° C, 300° C dengan durasi penekanan selama 15 detik. Hasil yang didapatkan semakin tinggi penekanan hidrolik menyebabkan transfer panas yang cepat sehingga adanya penyempurnaan butir dan meningkatkan sifat mekanik material tersebut. Menurut (**M. Kamaraj, 2015**) komposit hibrida aluminium LM6 memiliki sifat yang bagus seperti koefisien ekspansi panas yang rendah, ketahanan aus yang lebih baik dan sifat mekanik yang tinggi. Penerapan temperatur cetakan dapat meningkatkan sifat mekanik seperti kekerasan, kekuatan tarik dan ketangguhan. Proses pengecoran dilakukan dengan menuangkan logam cair kedalam cetakan melalui jalan yang menghubungkan tungku peleburan dengan cetakan. Jalan setapaknya dipanaskan untuk mempertahankan fluiditas logam cair kemudian ditekan dengan pers hidrolik. Dengan divariasikannya temperatur perkakas dan

volume cairan didapatkan kesimpulan sifat mekanik seperti kekerasan, kekuatan luluh dan kekuatan tarik akhir komposit meningkat dengan meningkatnya tekanan maksimum dengan beban sebesar 120 MPa dengan durasi penekanan selama 60 detik. Sehingga kepadatan dan kekerasan produk coran dapat meningkat dengan meningkatnya tekanan yang diberikan sehingga menghasilkan produk coran yang baik. Menurut **(Deepak Sigh, 2013)** parameter *squeeze casting* yang sangat berpengaruh diantaranya beban penekanan, durasi penekanan dan suhu yang memiliki dampak paling signifikan terhadap sifat mekanik. Untuk material logam paduan kuningan dengan memvariasikan beban penekanan sebesar 80 MPa, 120 MPa dan 160 MPa dengan variasi durasi penekanan 15 detik, 30 detik, 45 detik dan suhu *die* 50⁰ C, 100⁰ C, 150⁰ C. Menurut **(Li Fang, dkk, 2015)** pada beban penekanan 60 MPa dengan variasi temperatur cetakan 680, 700, dan 720°C didapat ketebalan 0,02 mm dengan diameter 0.10. analisa struktur mikro menghasilkan bahwa temperatur tuang yang rendah dapat menyempurnakan struktur dendrite dan membentuk eutektik dibatas dendrite. Menurut **(Razooqi. R.N, dkk, 2013)** Al A319 dihasilkan dari proses *squeeze casting* dengan beban penekanan 10, 15, 20, 25, 30 Mpa dan temperatur tuang 850°C dengan proses pemanasan T6 dengan panas isotermik. Perlakuan panas isotermik yang cepat menghasilkan peningkatan morfologi pada permukaan spesimennya lebih halus dan dapat diterima dibanding dengan perlakuan panas T6 dan kemungkinan juga dampak dari durasi paparan yang singkat dari percobaan pemanasan isotermik yang cepat, sehingga peningkatan laju oksidasinya berkurang dan lapisan oksidanya terkelupas. Menurut **(MT, Tofa, Zubaidin dan Wijoyo, 2017)** pengecoran daur ulang Al-Si digunakan menggunakan variasi temperatur tuang 670°C, 720°C, dan 770°C menunjukkan bahwa struktur mikro yang terjadi keseluruhan pada bahan coran berupa struktur *dendrite*. Struktur *dendrite* merupakan salah satu ciri dari almunium paduan (Al-Si). Yang membedakan variasi temperatur tuang adalah pada struktur *dendrite* dan susunannya. Pada temperatur 670°C mempunyai ukuran dendrite yang besar, padat, dan porositas sedang. Semakin besar temperatur pengecoran maka struktur *dendrite* akan semakin mengecil.

2.4. Perlakuan Panas T6

Heat treatment (perlakuan panas) adalah salah satu proses untuk mengubah struktur logam dengan cara memanaskan specimen pada *electric trance*

(tungku) pada temperatur rekristalisasi selama periode waktu tertentu, kemudian didinginkan pada media pendingin seperti udara, air, air garam dan solar yang masing-masing mempunyai kerapatan pendinginan yang berbeda beda. Dengan adanya pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu, maka bahan-bahan logam dan paduan memperlihatkan perubahan strukturnya. Perlakuan panas memiliki pengaruh yang besar pada karakteristik komposit seperti kekerasan dan ketahanan aus yang lebih baik (**Keshavamurthy dkk, 2016**). Menurut (**Guoping Liu, 2017**) alumunium 6101/A356 yang dilakukan proses perlakuan panas T6 (540 °C selama 5 jam, didinginkan di dalam air dingin dan penuaan pada 175 °C selama 4 jam) dapat memperbaiki sifat mekanis dan mikrostruktur yang terdiri dari struktur butir yang halus.

Perlakuan panas pada aluminium paduan dilakukan dengan memanaskan sampai terjadi fase tunggal kemudian ditahan beberapa saat dan diteruskan dengan pendinginan cepat hingga tidak sempat berubah ke fase lain. Jika bahan tadi dibiarkan untuk jangka waktu tertentu maka terjadilah proses penuaan (*aging*). Perubahan akan terjadi berupa presipitasi (*pengendapan*) fase kedua yang dimulai dengan proses nukleasi dan timbulnya klaster atom yang menjadi awal dari presipitat. Presipitat ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Proses ini merupakan proses *age hardening* yang disebut *natural aging*. Jika setelah dilakukan pendinginan cepat kemudian dipanaskan lagi hingga di bawah temperatur solvus (*solvus line*) kemudian ditahan dalam jangka waktu yang lama dan dilanjutkan dengan pendinginan lambat di udara disebut proses penuaan buatan (*artificial aging*).

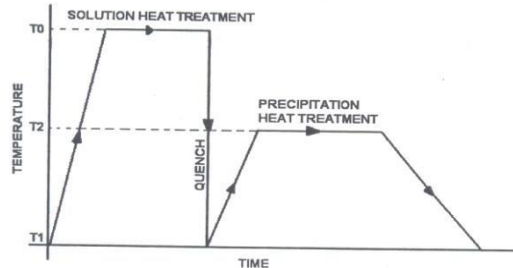
Salah satu cara perlakuan panas pada logam paduan aluminium adalah dengan penuaan keras (*age hardening*). Melalui penuaan keras, logam paduan aluminium akan memperoleh kekuatan dan kekerasan yang lebih baik. Dahulu orang menyebut penuaan keras dengan sebutan pemuliaan atau penemperan keras. Penamaan tersebut kemudian dibakukan menjadi penuaan keras karena penemperan keras pada logam paduan aluminium berbeda dengan penemperan keras yang berlangsung pada penemperan keras baja.

Paduan aluminium yang dapat ditua keraskan atau di *age hardening* dibedakan atas paduan aluminium yang dapat ditua keraskan dalam keadaan dingin dan paduan aluminium yang dapat ditua keraskan dalam keadaan panas. Penuaan keras berlangsung dalam tiga tahap.

Tahapan perlakuan panas T6 (*Age Hardening*) adalah :

1. *Solution treatment*

2. *Quenching*
3. *Aging*

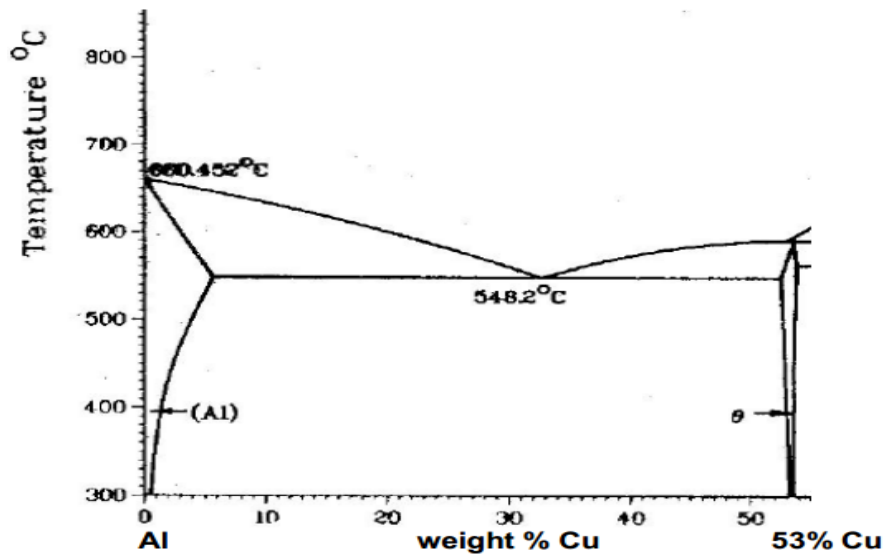


Gambar 2.1. Siklus Perlakuan Panas (Rahman. K, 2012).

2.4.1. Solution Heat Treatment (Perlakuan Panas Pelarutan)

Tahap pertama dalam proses age hardening yaitu *solution heat treatment* atau perlakuan panas pelarutan. *Solution heat treatment* yaitu pemanasan logam aluminium dalam dapur pemanas dengan temperatur 550°C - 560°C dan dilakukan penahanan atau *holding* sesuai dengan jenis dan ukuran benda kerja (Schonmetz, 1990). pada tahap *solution heat treatment* terjadi pelarutan fasa-fasa yang ada, menjadi larutan padat. Tujuan dari *solution heat treatment* itu sendiri yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen.

Proses *Solution heat treatment* dapat dijelaskan dalam gambar 2. dimana logam paduan dipanaskan dalam dapur pemanas hingga mencapai temperatur T1. Pada temperatur T1 fase logam paduan akan berupa kristal campuran α (symbol angka 8 miring kepotong) dalam larutan padat. Pada temperatur T1 tersebut pemanasan ditahan beberapa saat agar didapat larutan padat yang mendekati homogen.



Gambar 2.2. Diagram fasa perlakuan panas Al-Cu.

2.4.2. *Quenching* (Pendinginan Cepat)

Quenching (pendinginan cepat) dengan mencelupkan ke dalam air atau media pendingin lainnya yang dilakukan pada temperatur rendah untuk memperoleh larutan padat jenuh. Menurut (M. Mohandass dkk, 2014), *Quenching* atau pendinginan cepat, bertujuan mempertahankan larutan padat yang telah terbentuk, dapat pula dikatakan bahwa proses ini berguna untuk menahan atom-atom yang larut dalam atom pelarut. Jadi ketika paduan didinginkan dari temperatur pelarut dalam keadaan cepat. Proses pembentukan presipitat dalam aluminium terjadi dengan cepat pada temperatur 260-400°C. Walaupun pendinginan cepat akan menciptakan tegangan sisa dan distorsi tetapi ini juga menjadi suatu pertimbangan tersendiri pada setiap proses desain paduan. Pendinginan cepat juga memperbaiki ketahanan terhadap korosi.

2.4.3. *Aging* (Tahapan Penuaan).

Aging dapat dilakukan dengan membiarkan larutan lewat jenuh itu pada temperatur kamar selama beberapa waktu. Dinamakan *natural aging* atau dengan memanaskan kembali larutan lewat jenuh itu ke temperatur di bawah garis solvus dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama beberapa saat. Dinamakan *artificial aging* Bila *aging* temperatur terlalu tinggi dan atau *aging time* terlalu panjang maka partikel yang terjadi akan terlalu besar (sudah mikroskopik) sehingga efek

penguatannya akan menurun bahkan menghilang sama sekali, dan ini dinamakan *over aged*.

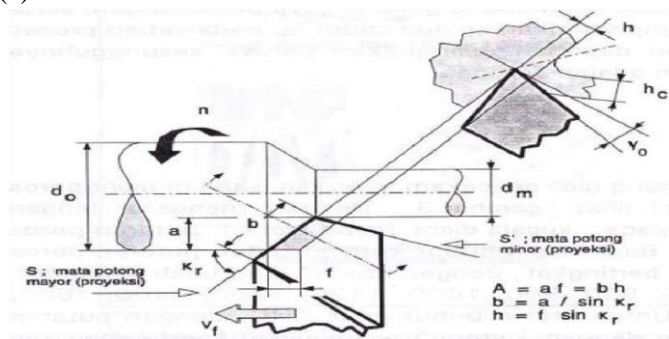
Setelah dilakukan pendinginan cepat kemudian dipanaskan lagi hingga dibawah temperatur solvus (*solvus line*) kemudian ditahan dalam jangka waktu yang lama dan dilanjutkan dengan pendinginan lambat di udara. Perubahan sifat-sifat dengan berjalannya waktu pada umumnya dinamakan *aging* atau penuaan. Aging atau penuaan pada logam paduan dibedakan menjadi dua, yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*).

Aging (perlakuan penuaan) yaitu perlakuan panas dengan menahannya pada suatu temperatur tertentu (temperatur kamar atau temperatur dibawah *solvus line*/batas pelarut) untuk jangka waktu tertentu. Penuaan dapat dibagi menjadi dua yaitu :

- 1) Penuaan yang dilakukan dengan membiarkan larutan padat jenuh itu pada temperatur kamar selama beberapa waktu, dinamakan *natural aging* yaitu penuaan yang terjadi secara alamiah.
- 2) Penuaan dengan memanaskan kembali larutan padat jenuh itu kesuatu temperatur di bawah garis *solvus* dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama beberapa saat, dinamakan *artificial aging* (*aging buatan/aging treatment*).

2.5. Proses Permesinan Pembuatan Baut dan Mur

Setelah proses pengecoran membentuk specimen mur dan baut dengan metode Squeeze casting, specimen dikeluarkan dari dalam cetakan dan dilakukan proses permesinan dengan mesin bubut manual. Dalam Teori dan Teknologi Proses Permesinan secara umum pada proses bubut terdapat tiga parameter utama yaitu kecepatan potong (v), pemakanan (f), dan kedalaman potong (a).



Gambar 2.3. Parameter Proses Pembubutan.

Elemen dasar pada proses bubut dapat diketahui menggunakan rumus yang dapat diturunkan berdasarkan gambar di atas dimana kondisi pemotongan ditentukan sebagai berikut :

Benda kerja ; d_o = diameter awal ;
mm, d_m = diameter
akhir ; mm,

l_t = panjang permesinan ; mm,

Pahat ; K_r = sudut potong utama
; γ_o = sudut geram ; $^\circ$,

Mesin bubut ; a = kedalaman potong ; mm,

$$a = (d_o - d_m) / 2 ; \text{ mm,(2.1)}$$

f = gerak makan ; mm/r, n = putaran poros utama
(benda kerja) ; r/min.

Elemen dasar dapat dihitung dengan rumus-rumus berikut :

Kecepatan potong :

$$v = \pi \cdot d \cdot n / 1000 ; \text{ m/min,(2.2)}$$

dimana, d = diameter rata-rata ; mm, yaitu,

$$d = (d_o + d_m) / 2 ; \text{ mm,(2.3)}$$

Kecepatan makan :

$$vf = f \cdot n ; \text{ mm/min,(2.4)}$$

Waktu pemotongan :

$$t_c = l_t / vf ; \text{ min,(2.5)}$$

Kecepatan penghasil geram :

$$Z = A \cdot v ; \text{ cm}^3/\text{menit,(2.6)}$$

$$\text{dimana, } A = a \cdot f ; \text{ mm}^2, \text{(2.7)}$$

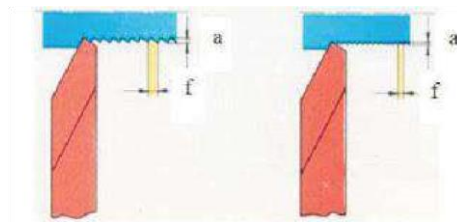
Dari parameter yang disebutkan diatas, parameter utama yang secara umum dapat diatur pada mesin bubut yaitu kecepatan putar spindel (*speed*), gerak makan (*feeding*) dan kedalaman. Potong (*depth of cut*). Faktor yang lain

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.

Kecepatan putar, n (*speed*), selalu dihubungkan dengan sumbu utama (*spindel*) dan benda kerja. Kecepatan putar dinotasikan sebagai putaran per menit (*rotations per minute, rpm*). Akan tetapi yang diutamakan dalam proses bubut adalah kecepatan potong (*cutting speed atau v*) atau kecepatan benda kerja dilalui oleh pahat/keliling bend kerja. Secara sederhana kecepatan potong dapat digambarkan sebagai keliling benda kerja dikalikan dengan kecepatan putar atau seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.2.

Dengan demikian kecepatan potong ditentukan oleh diameter benda kerja. Selain kecepatan potong ditentukan oleh diameter benda kerja faktor bahan benda kerja dan bahan pahat sangat menentukan harga kecepatan potong. Pada dasarnya pada waktu proses bubut kecepatan potong ditentukan berdasarkan bahan benda kerja dan pahat.

Gerak makan, f (*feed*), adalah jarak yang ditempuh pahat pada setiap putaran benda kerja, dengan gerakan ini maka akan mengalir geram yang dihasilkan, 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).



Gambar 2.4. Gerak Makan (f) dan Kedalaman Potong (a).

Kedalaman potong (a) (*depth of cut*), adalah dalamnya pahat menusuk benda kerja saat penyayatan atau tebalnya tatal bekas pembubutan. Ketika pahat memotong sedalam a , maka diameter benda kerja akan berkurang dua kali kedalaman a , karena bagian permukaan benda kerja yang dipotong ada di dua sisi, akibat dari benda kerja yang berputar.

Selain dari penurunan rumus parameter proses pembubutan juga dapat ditentukan dari material benda kerja dan diameter benda kerja serta material

pahat. Berikut adalah tabel pengaruh material terhadap parameter proses pembubutan.

Tabel 2.1. Kecepatan Pemakanan untuk Pahat HSS.

Material	Pekerjaan Kasar		Pekerjaan Penyelesaian	
	mm/min	inch/min	mm/min	inch/min
Baja Mesin	0,25 - 0,50	0,010 - 0,020	0,07 - 0,25	0,003 - 0,010
Baja Perkakas	0,25 - 0,50	0,010 - 0,020	0,07 - 0,25	0,003 - 0,010
Besi Tuang	0,40 - 0,65	0,015 - 0,025	0,13 - 0,30	0,005 - 0,012
Perunggu	0,40 - 0,65	0,015 - 0,025	0,13 - 0,30	0,005 - 0,012
Aluminium	0,40 - 0,75	0,015 - 0,030	0,13 - 0,25	0,005 - 0,010

Tabel 2.2. Tabel Kecepatan Potong dan Kedalaman Maksimum.

Material	Tipe Pemotongan	Diameter (mm)	Kecepatan Potong (mm/min)	Kedalaman Potong Maksimum (mm)	Kecepatan Putar Spindle (rpm)
Aluminium (Rekomendasi dari Light Machine Corporation)	Finishing	9,525 - 12,7	50,8	0,20	2000
		12,71 - 19,05	50,8	0,13	2000
		19,051 - 38,1	50,8	0,08	2000
	Kasar	9,525 - 12,7	50,8	0,51	2000
		12,71 - 19,05	50,8	0,25	2000
		19,051 - 38,1	50,8	0,15	2000
Kuningan (Rekomendasi dari Light Machine Corporation)	Finishing	9,525 - 12,7	50,8	0,25	2000
		12,71 - 19,05	50,8	0,15	2000
		19,051 - 38,1	50,8	0,08	2000
	Kasar	9,525 - 12,7	76,2	0,56	2000
		12,71 - 19,05	76,2	0,36	2000
		19,051 - 38,1	76,2	0,18	2000
Kayu Keras (Rekomendasi dari J. Flowers)	Finishing	9,525 - 12,7	76,2	0,51	2000
		12,71 - 19,05	76,2	0,51	2000
		19,051 - 38,1	76,2	0,51	2000
	Kasar	9,525 - 12,7	101,6	1,27	2000
		12,71 - 19,05	101,6	1,02	2000
		19,051 - 38,1	101,6	0,76	2000

(Sumber : Flowers, 2015)

Tabel 2.3. Kecepatan Potong Untuk Beberapa Jenis Bahan (mm/min).

Bahan	Pahat Bubut HSS		Pahat Bubut Karbida	
	m/men	Ft/min	M/men	Ft/min
Baja lunak(<i>Mild Steel</i>)	18 – 21	60 – 70	30 – 250	100 – 800
Besi Tuang(<i>Cast Iron</i>)	14 – 17	45 – 55	45 - 150	150 – 500
Perunggu	21 – 24	70 – 80	90 – 200	300 – 700
Tembaga	45 – 90	150 – 300	150 – 450	500 – 1500
Kuningan	30 – 120	100 – 400	120 – 300	400 – 1000
Aluminium	90 - 150	300 - 500	90 - 180	b. – 600

(Sumber : Mujabirul Khoir, 2011)

Tabel 2.4. Hubungan Diameter Benda Kerja, Kecepatan Potong dan Putaran Mesin.

D (mm)	Vc (m/min)	Kecepatan Putar (rpm)
5	20 - 40	1250 - 2500
6	20 - 40	1050 - 2100
7	20 - 40	900 - 1800
8	20 - 40	800 - 1550
9	20 - 40	700 - 1400
10	20 - 40	650 - 1250
12	30 - 70	780 - 1225
14	40 - 70	900 - 1550
16	40 - 70	780 - 1400
18	40 - 70	700 - 1250
20	40 - 70	625 - 1100
25	40 - 70	500 - 900
30	40 - 70	425 - 750
35	40 - 70	360 - 650
40	50 - 100	400 - 800
45	50 - 100	350 - 700
50	50 - 100	225 - 650

2.6. Pengukuran CMM (*Coordinate measuring machine*)

Dalam fisika dan teknik, pengukuran merupakan aktivitas yang membandingkan kuantitas fisik dari objek dan kejadian dunia nyata. Alat ukur adalah alat yang di gunakan untuk mengukur benda atau kejadian tersebut. Seluruh alat pengukur dapat terkena kesalahan yang bervariasi. Bidang ilmu yang mempelajari cara-cara pengukuran dinamakan metrologi. Kedataran adalah kondisi dari sebuah permukaan yang mempunyai banyak elemen–elemen dalam sebuah permukaan bidang yang sama. Toleransi kedataran adalah suatu tindakan pengukuran yang berfungsi dalam mengontrol dari banyak elemen–elemen pada sebuah permukaan yang kemudian dihubungkan dengan permukaan yang tersimulasi secara ideal dengan teori.

Coordinate measuring machine (mesin pengukur koordinat) adalah sebuah alat pengukur multi fungsi berkecepatan tinggi yang menghasilkan akurasi dan efisiensi pengukuran yang tinggi.



Gambar 2.5. CMM (*Coordinate measuring machine*)

Pada prinsipnya CMM kebalikan dari CNC. Pada CNC kordinat yang dimasukkan menghasilkan gerakan pahat pada sumbu X, Y dan Z. Sedangkan pada CMM kontak antara probe dengan benda kerja menghasilkan kordinat. Selain itu jika pada mesin CNC menggunakan bantalan peluru bersikulasi (*circulated ball bearing*) maka pada mesin CMM menggunakan bantalan udara (*air pad bearing*) sehingga gerakannya sangat halus. Untuk menjamin keakuratannya konstruksi CMM di buat sangat kaku (*rigit*). Salah satu caranya dengan menggunakan granit sebagai meja atau bidang acuan.

Menentukan spesifikasi CMM sangat penting untuk menyesuaikan antara benda kerja dengan kemampuan CMM tersebut. Kapasitas dalam CMM adalah ukuran maksimum dari objek atau benda kerja dimana mesin CMM dapat mengakomodasinya. Sebuah CMM harus memiliki kapasitas yang cukup agar sesuai dengan ukuran benda kebutuhan pengguna untuk mengukur. Pengukuran kecepatan adalah tingkat dimana CMM dapat membaca posisi dan melakukan pengukuran. probe, atau untuk proses pengukuran secara keseluruhan, yang juga merupakan fungsi dari jenis kontrol (CNC menjadi lebih cepat dari kontrol manual).

CNC (Computer Numerical Control) atau DCC (Kontrol Komputer Langsung) adalah sistem kontrol yang dibangun di CMM untuk mengontrol gerakan probe. CNC-CMMS paling cocok untuk lingkungan produksi yang membutuhkan volume yang lebih tinggi pengukuran, dan juga dalam aplikasi yang memerlukan pengukuran kompleks dan kecil dengan fitur halus.

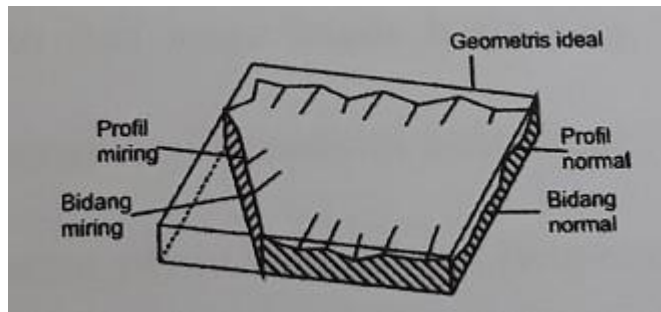
CMM terdiri dari beberapa bagian utama yang saling terakit dan mempengaruhi akurasi mesin tersebut, bagian-bagian tersebut adalah :

1. Working Table, merupakan tempat meletakkan part yang akan diukur. Rata-rata terbuat dari batu granit.
2. Support, merupakan kaki untuk menopang seluruh beban CMM. Beberapa CMM dilengkapi air damper untuk mengurangi efek getaran yang dihasilkan lingkungan sekitar CMM.
3. Air bearing, CMM menggunakan air bearing sebagai landasan untuk bergerak bagi semua axis.
4. Axis Guideways, adalah track atau lintasan semua axis untuk bergerak, memiliki kontak langsung dengan air bearing. Material rata-rata terbuat dari alumunium ada juga yang menggunakan batu granit, untuk mesin dengan akurasi lebih tinggi menggunakan bahan ceramic.
5. Motor, adalah unit untuk menggerakkan axis, khusus untuk mesin otomatis atau hanya motorized menggunakan joystick.
6. Joystick, merupakan control panel untuk memudahkan operator mengoperasikan mesin.
7. Controller, memiliki beragam fungsi diantaranya : interface antara mesin dengan PC, motor driver sebagai sumber daya bagi pergerakan motor, data storage untuk menyimpan file-file c0rrection atau program penggerak CMM, ADC dan DAC, dll.

8. Probe Head, berfungsi sebagai trigger bagi CMM untuk merekam posisi koordinat part yang disentuhnya (touch point). Beberapa CMM dilengkapi non-contact Probe Head untuk mendapatkan touching point yang banyak bisa mencapai ratusan bahkan ribuan point untuk keperluan CAD/CAM. Untuk menyentuh part tidak dapat langsung disentuh ke part tetapi harus melalui perantara stylus yang berfungsi sebagai peraba.
9. Sensor-sensor, CMM memiliki banyak sensor untuk meningkatkan akurasi sensor tersebut diantaranya : temperature sensor, overcurrent sensor, limit switch, home position sensor, air pressure sensor, reading head.
10. Linear Scale, unit ini sebagai transducer untuk merubah perubahan posisi menjadi arus atau tegangan yang kemudian dengan menggunakan software menjadi data-data koordinat X, Y dan Z.
11. Software, merupakan program penghubung antar user mesin.
 - Keunggulan CMM :
 - Koordinat manapun dari benda kerja dapat ditentukan dengan mudah.
 - Presisi pengukuran yang tinggi.
 - Unit pengolah data dapat mengolah data secara cepat dan langsung bisa dicetak.
 - Waktu setting pengukuran yang singkat.
 - Kekurangan CMM :
 - Harganya cukup mahal.
 - Membutuhkan skill khusus untuk bisa mengoperasikan.

2.7. Pengujian Kekasaran Permukaan

Pengujian kekasaran permukaan Kekasaran permukaan (*Surface Roughness*) merupakan suatu nilai dimana besar kecilnya profil permukaan benda. Kekasaran dalam proses permesinan yaitu hasil dari proses permesinan tersebut. Dalam proses permesinan itu nilai kekasaran permukaan merupakan sifat yang penting karena sangatlah menentukan kualitas produk yang dihasilkan.



Gambar 2.6. Bidang dan profil permukaan.

Setiap permukaan dari suatu benda kerja yang telah mengalami proses permesinan tentu akan mengalami kekasaran permukaan (*Surface Roughness*). Yang dimaksud dengan kekasaran permukaan adalah penyimpangan rata-rata aritmetik dari garis rata-rata permukaan. Definisi ini digunakan untuk menentukan harga rata-rata dari kekasaran permukaan.

Dalam dunia perindustrian, permukaan pada benda kerja memiliki nilai kekasaran permukaan yang berbeda, sesuai dengan kebutuhan dari alat tersebut. Nilai kekasaran permukaan permukaan (*Surface Roughness*) memiliki nilai kualitas (N) yang berbeda. Nilai kualitas kekasaran permukaan telah diklasifikasikan oleh ISO dimana harga yang sangatlah kecil adalah N1 yang memiliki nilai kekasaran permukaan (R_a) $0,025 \mu\text{m}$ dan yang paling tinggi N12 yang nilai kekasarannya $50\mu\text{m}$. (Sigit Pratama, 2017).

Tabel 2.5. Angka kekasaran permukaan.

Kelas Kekasaran	Harga R_a (μm)	Toleransi (μm) (+50% & -25%)	Panjang sampel (mm)
N1	0,025	0,02 – 0,04	0,08
N2	0,05	0,04 – 0,08	0,25
N3	0,1	0,08 – 0,15	
N4	0,2	0,15 – 0,03	
N5	0,4	0,03 – 0,06	
N6	0,8	0,6 – 1,2	0,8
N7	1,6	1,2 – 2,4	
N8	3,2	2,4 – 4,8	
N9	6,3	4,8 – 9,6	2,5
N10	12,5	9,6 – 18,75	
N11	25	18,5 – 37,5	8
N12	50	37,5 – 75,0	

2.7.1. Alat Ukur Kekasaran Permukaan

Alat ukur kekasaran permukaan yang digunakan adalah Surface Roughness Mitutoyo, alat ini dapat digunakan untuk mengamati ataupun mengukur kekasaran permukaan dengan standart ISO. Beberapa data yang dapat ditunjukkan oleh alat kekasaran permukaan (*Surface Roughness*) ini adalah nilai parameter - parameter dari kekasaran permukaan beserta grafik pada kekasaran permukaannya. Alat ukur kekasaran permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Alat Surface Roughness Tester Mitutoyo.

Surface Roughness Tester adalah alat uji yang digunakan untuk mengukur kekasaran pada suatu permukaan benda. Setiap komponen atau benda mempunyai permukaan yang berbeda dan bervariasi menurut struktur ataupun menurut dari hasil proses permesinannya. Kekasaran (*Roughness*) dapat didefinisikan sebagai ketidak halusan pada bentuk yang menyertai proses produksi yang disebabkan oleh pengerjaan permesinan. Nilai kekasaran permukaan dinyatakan dalam *Roughness Average (Ra)*, merupakan parameter kekasaran yang paling banyak digunakan. Ra merupakan rata - rata aritmatika dan suatu penyimpangan mutlak profil kekasaran dari garis tengah rata - rata.

Pengukuran kekasaran permukaan didapatkan dari sinyal pergerakan *Stylus* berbentuk *diamond* untuk bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan sebagai alat indikator pengukuran kekasaran permukaan benda yang diuji. Prinsip kerja dari alat Surface Roughness Tester adalah dengan menggunakan Transduser dan diolah dengan

Microprocessor. Alat ini dapat digunakan dilantai dan semua posisi baik horizontal, vertikal, dan lain-lain.

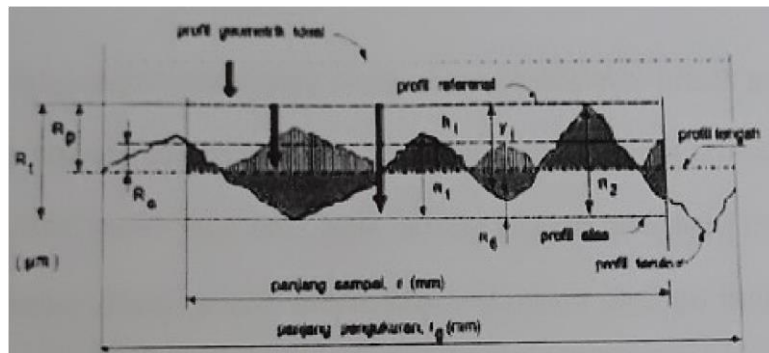


Gambar 2.8. *Stylus Surface Roughness Tester.*

Cara kerja dari alat ukur kekasaran permukaan (*Surface Roughness*) adalah dengan meletakkan jarum sensor (*Stylus*) yang dipasangkan pada alat uji tersebut, selanjutnya sejajarkan alat ukur permukaan tersebut dengan bidang material yang akan diuji. Pada saat pengerjaannya, alat ukur tidak boleh bergerak karena akan mengganggu sensor dalam membaca kekasaran dari permukaan material tersebut. Nilai pengukuran yang didapatkan akan muncul pada display yang kompetibel dengan empat standart dunia antara lain ISO, SIN, ANSI, dan JIS sehingga tidak diragukan lagi ketepatan dan keakuratan ketelitian dalam pengukuran.

2.7.2. Parameter Kekasaran Permukaan

Profil adalah garis yang dihasilkan pada proses pemotongan, khususnya pemotongan lurus (*Orthogonal Cutting*) dan pemotongan miring (*Oblique Cutting*). Untuk memproduksi profil suatu permukaan, sensor / peraba (*Stylus*) alat ukur harus digerakkan mengikuti lintasan yang berupa garis lurus dengan jarak yang telah ditentukan terlebih dahulu. Panjang lintasan tersebut dengan panjang pengukuran (*Traversing Length*). Sesaat setelah jarum bergerak dan sebelum jarum berhenti secara elektronik alat ukur kekasaran melakukan perhitungan berdasarkan data yang dideteksi oleh jarum peraba. Bagian panjang pengukuran yang dibaca oleh sensor alat ukur kekasaran permukaan disebut panjang sampel.



Gambar 2.9. Bentuk profil kekasaran permukaan.

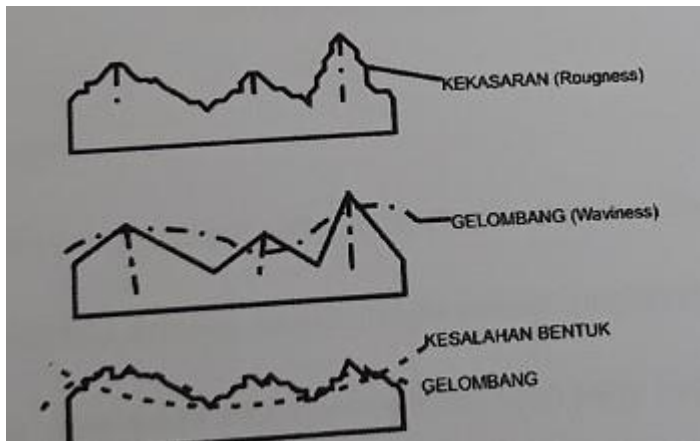
Dari gambar diatas, dapat didefinisikan beberapa parameter kekasaran permukaan yaitu :

1. Kekasaran Total (R_t) merupakan jarak antara garis referensi dengan garis alas.
2. Kekasaran Perataan (R_p) merupakan jarak antara garis referensi dengan garis terukur.
3. Kekasaran Rata-rata Aritmatik (R_a) merupakan nilai aritmatik dari antara garis tengah dan garis terukur.

Bentuk profil sesungguhnya dengan beberapa keterangan lain, seperti :

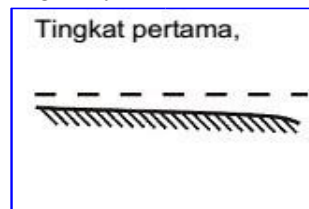
1. Profil Geometric ideal adalah garis permukaan yang sempurna didapat berupa garis lurus, lengkung atau busur.
2. Profil Terukur adalah garis permukaan yang terukur.
3. Profil Referensi / puncak acuan merupakan garis yang digunakan sebagai acuan untuk menganalisa ketidak aturan bentuk permukaan.
4. Profil Alas adalah garis yang berada dibawah yang menyinggung terendah.
5. Profil Tengah merupakan garis yang berada ditengah-tengah antara pumcak tertinggi dan lembah terdalam.

Sedangkan permukaan yang bergelombang mempunyai bentuk gelombang yang lebih panjang dan tidak teratur yang dapat terjadi karena beberapa faktor misalnya posisi senter yang tidak tepat, adanya gerakan tidak lurus (*Non Linier*) dari permukaan (*Feed*), getaran mesin, tidak imbangnya (*Balance*) batu gerindra, perlakuan panas (*Heat Treatment*) yang kurang baik, dan lain sebagainya. Dari kekasaran (*Roughness*) dan gelombang (*Wanivess*) inilah yang kemudian timbul kesalahan bentuk.



Gambar 2.10. Kekasaran, gelombang, kesalahan bentuk gelombang.

Secara lebih rinci lagi, ketidakrataan dari bentuk permukaan dapat dibedakan menjadi empat tingkat, yaitu :



Gambar 2.11. Tingkat 1 ketidakrataan permukaan.

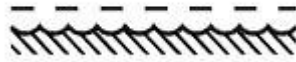
adalah tingkat yang menunjukkan adanya kesalahan bentuk (*form error*) seperti tampak pada gambar disamping. Faktor penyebabnya antara lain karena lenturan dari mesin perkakas dan benda kerja, kesalahan pada penekaman benda kerja, pengaruh proses pengerasan (*hardening*).



Gambar 2.12. Tingkat 2 ketidakrataan permukaan.

adalah profil permukaan yang berbentuk gelombang. Penyebabnya antara lain karena adanya kesalahan bentuk pada pisau (pahat) potong, posisi senter yang kurang tepat, adanya getaran pada waktu proses pemotongan.

Tingkat ketiga,



Gambar 2.13. Tingkat 3 ketidakteraturan permukaan.

adalah profil permukaan yang berbentuk alur (*grooves*). Penyebabnya antara lain karena adanya bekas-bekas proses pemotongan akibat bentuk pisau potong yang salah atau gerak pemakanan yang kurang tepat (*feed*).

Tingkat keempat,



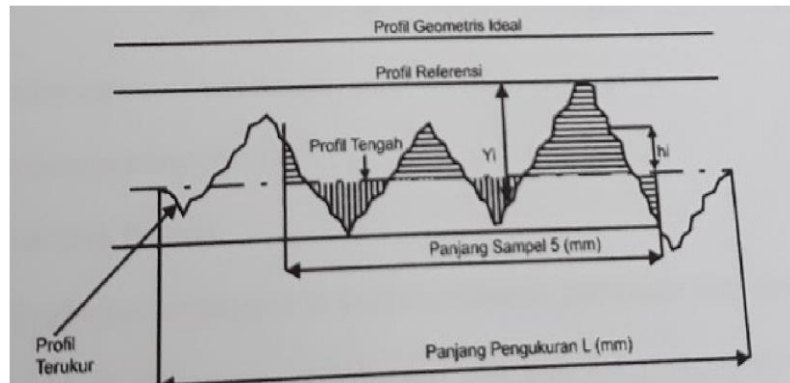
Gambar 2.14. Tingkat 4 ketidakteraturan permukaan.

adalah profil permukaan yang berbentuk serpihan (*flakes*). Penyebabnya antara lain karena adanya tatal (beram) pada proses pengerjaan, pengaruh proses electroplating.

Sebelum membicarakan parameter - parameter permukaan yang perlu dibicarakan terlebih dahulu ialah mengenai profil permukaan.

1. Profil Tengah (*Centre Profile*)

Profil tengah adalah profil yang berbeda ditengah tengah dengan posisi sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagian atas profil tengah sampai pada profil terukur sama dengan jumlah luas bagian bawah profil tengah sampai pada profil terukur. Profil tengah ini juga sebetulnya merupakan profil referensi yang digeserkan ke bawah dengan arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal sampai pada batas tertentu yang membagi luas penampang permukaan menjadi dua bagian yang sama yaitu atas dan bawah.



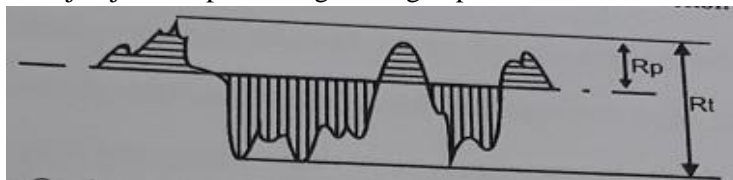
Gambar 2.15. Profil suatu permukaan.

2. Kedalaman Total (*Peak to Valley*) R_t

Kedalaman total adalah besarnya jarak dari profil referensi sampai dengan profil dasar. Satuannya adalah dalam *Micron* (μm).

3. Kedalaman Perataan (*Peak to Mean Line*) R_p

Kedalaman perataan (R_p) merupakan jarak rata-rata dari profil referensi sampai dengan profil terukur. Juga dikatakan bahwa kedalaman perataan merupakan jarak antara profil tengah dengan profil referensi.



Gambar 2.16. Kedalaman total dan kedalaman perataan.

2.7.3. Kekasaran Rata-Rata Aritmetis (R_a)

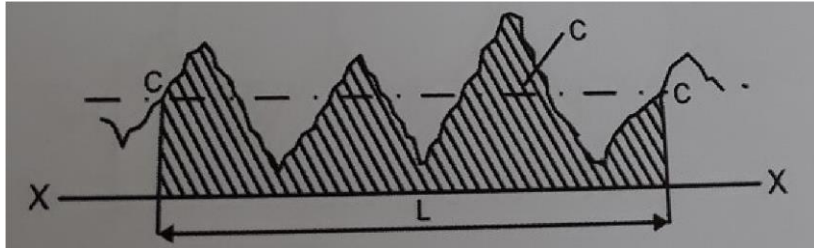
Kekasaran rata-rata merupakan harga-harga rata-rata secara aritmetis dari harga absolut antara harga profil terukur dengan harga profil tengah.

$$R_a = \frac{1}{s} \int_0^1 h_i^2 \cdot dx \quad (\mu\text{m}) \quad \dots \dots \dots (2.11)$$

Menentukan kekasaran rata-rata (R_a) dapat dilakukan secara grafis. Adapun caranya sebagai berikut :

1. Langkah Pertama

Gambarkan sebuah garis lurus pada penampang permukaan yang diperoleh dari hasil pengukuran (Profil Terukur) yaitu garis X-X yang posisinya tepat menyentuh lembah paling dalam.



Gambar 2.17. Menentukan nilai R_a .

2. Langkah Kedua
Ambil sampel panjang pengukuran sepanjang (*Length*) yang memungkinkan memuat sejumlah bentuk gelombang yang hampir sama.
3. Langkah Ketiga
Ambil luasan daerah A dibawah kurva dengan menggunakan planimeter dengan metode ordinat. Dengan demikian diperoleh jarak garis center C-C terhadap garis X-X secara tegak lurus yang besarnya adalah :

$$Hm = \frac{\text{Daerah A}}{L} \dots\dots\dots (2.12)$$

4. Langkah Keempat
Sekarang diperoleh suatu garis yang membagi profil terukur menjadi dua bagian yang hampir sama luasnya yaitu luasan daerah di atas ($P_1+P_2+ \dots$ dan seterusnya).

Dengan demikian nilai R_a dapat ditentukan besarnya yaitu :

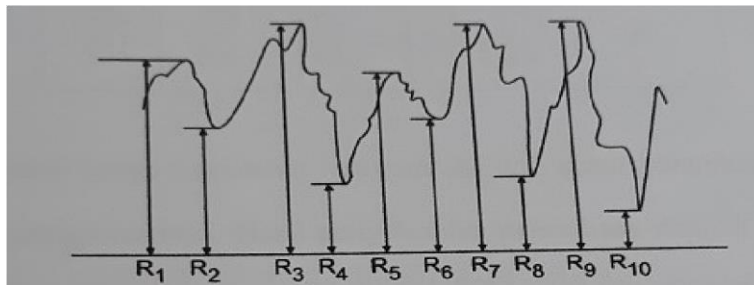
$$Ra = \frac{\text{Luas daerah P} + \text{Luas daerah Q}}{L} \times \frac{1000}{Vv} \quad (\mu\text{m}) \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

Vv : Perbesaran vertikal. Luas P dan Q dalam milimeter.

L : Panjang pengukuran sampel dalam milimeter.

Kekasaran rata-rata dari puncak ke lembah, Rz sebetulnya hampir sama dengan kekasaran rata-rata aritmetis Ra , tetapi cara menentukan Rz adalah lebih mudah daripada menentukan Ra . Gambar 2.26. menunjukkan cara menentukan Rz . Sampel pengukuran diambil sejumlah profil yang memuat, misalnya 10 daerah yaitu 5 daerah puncak dan 5 daerah lembah.



Gambar 2.18. Menentukan kekasaran rata - rata dari puncak ke lembah.

Kemudian buat garis lurus horizontal dibawah profil permukaan. Tarik garis tegak lurus dari masing-masing ujung puncak dan lembah ke garis horizontal. Dengan cara ini maka diperoleh harga Rz yang besarnya adalah :

$$Rz = \frac{1}{5}(R1 + R3 + R5 + R7 + R9 + Pa) - \frac{1}{5}(R2 + R4 + R6 + R8 + R10) \times \frac{1000}{Vv}$$

2.7.4. Toleransi Harga Ra

Seperti halnya toleransi ukuran (lubang dan poros), harga kekasaran rata - rata aritmetis Ra juga mempunyai harga toleransi kekasaran. Dengan demikian masing - masing harga kekasaran mempunyai kelas

kekasaran yaitu dari N1 sampai N12. Besarnya toleransi untuk Ra biasanya diambil antara 50% keatas dan 50% ke bawah.

Tabel 2.6. Toleransi Harga kekasaran rata - rata *Ra*.

Kelas kekasaran	Harga C.L.A (µm)	Harga Ra (µm)	Toleransi $N^{+25\%}$ -25%	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	
N5	16	0.4	0.3 - 0.6	0.25
N6	32	0.8	0.6 - 1.2	
N7	63	1.6	1.2 - 2.4	
N8	125	3.2	2.4 - 4.8	
N9	250	6.3	4.8 - 9.6	0.8
N10	500	12.5	9.6 - 18.75	
N11	1000	25.0	18.75 - 37.5	
N12	2000	50.0	37.5 - 75.0	
				8

Toleransi harga kekasaran rata - rata, *Ra* dari suatu permukaan tergantung pada proses pengerjaannya. Hasil penyelesaian permukaan dengan menggunakan mesin gerinda yang sudah tentu lebih halus dari pada proses dengan menggunakan mesin bubut . Tabel 2.6. berikut ini memberikan contoh harga kelas kekerasan rata - rata menurut proses pengerjaannya.

Tabel 2.7. Tingkat kekasaran menurut proses pengerjaan.

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>	$N_1 - N_6$	0.025 - 3.2
<i>Finishing</i>	$N_4 - N_5$	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