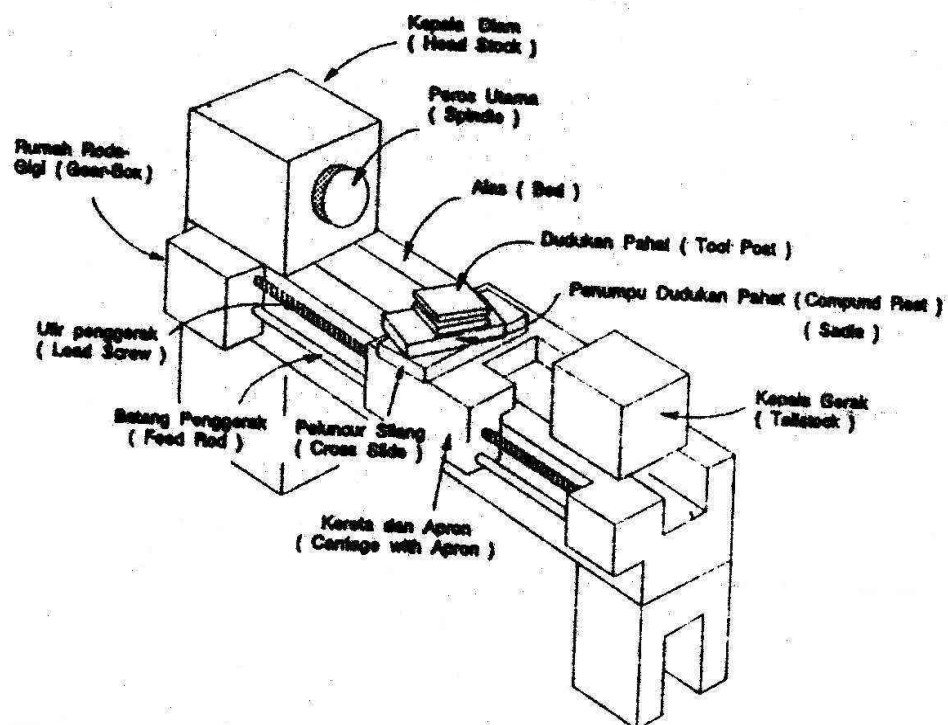


2. TEORI DASAR

1. Proses Bubut (*turning*)

Benda kerja dipegang oleh pencekam (*chucking*) yang dipasang diujung poros utama (*spindel*), Gambar 2.1. Dengan mengatur lengan pengatur yang terdapat pada kepala diam (*head stock*), putaran poros utama (n) dapat dipilih. Harga putaran poros utama umumnya dibuat bertingkat, dengan aturan yang telah distandarkan, misalnya 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600, 1800 dan 2000 rpm. Untuk mesin bubut dengan putaran motor variabel, ataupun dengan sistem transmisi variabel, kecepatan putaran poros utama tidak lagi bertingkat melainkan berkesinambungan (*continue*). Pahat dipasang padaudukan pahat dan kedalaman potong (a) diatur dengan menggeser peluncur silang melalui roda pemutar.



Gambar 2.1 Mesin Bubut

Sumber: Teori dan Teknologi Proses Pemesinan, Taufiq Rochim 1993

Kondisi pemotongan ditentukan oleh:

Benda kerja; d_o = diameter awal ; mm

d_m = diameter akhir ; mm

l_t = panjang pemotongan ; mm

Pahat ; K_r = sudut potong utama ; °

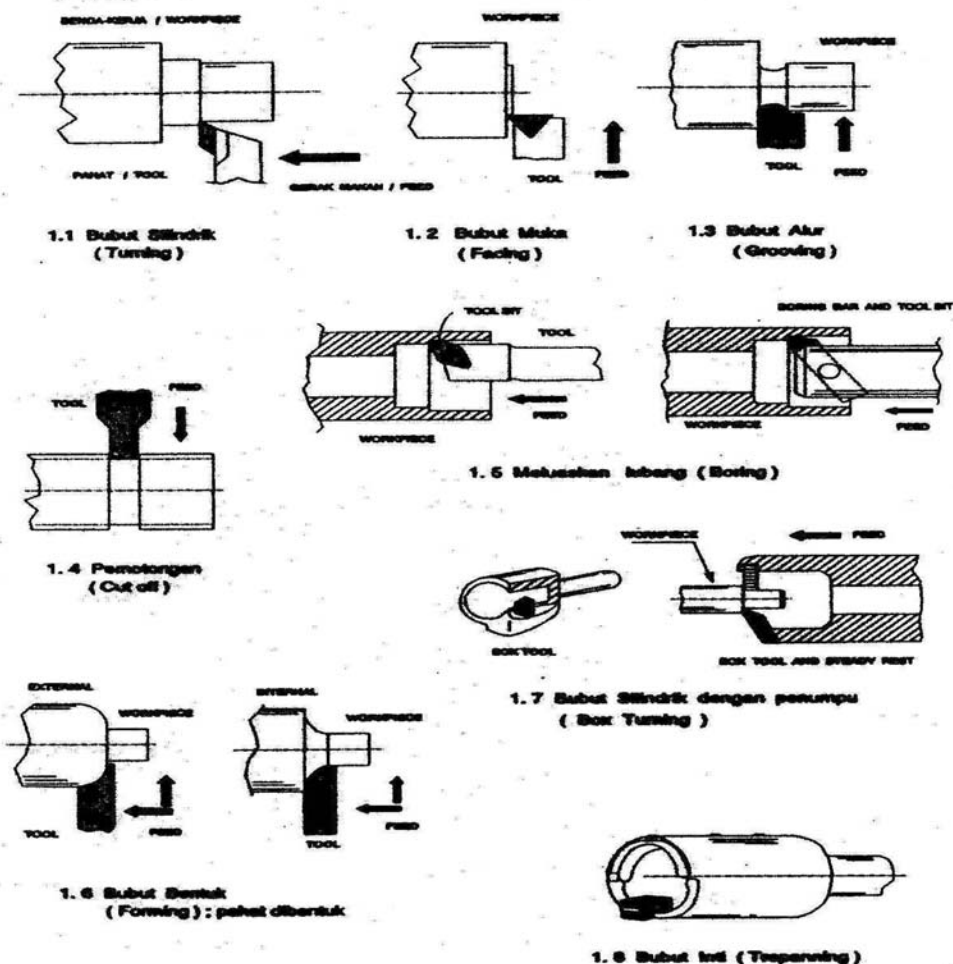
Γ_o = sudut geram ; °

Mesin bubut a = kedalaman potong ; mm

$$a = (d_o - d_m)/2 \quad (2.1)$$

f = gerak pemakanan ; mm/(r)

n = putaran poros utama ; (r)/min



Gambar 2.2 Proses bubut

Sumber: Teori dan Teknologi Proses Pemesinan, Taufiq Rochim 1993

Elemen dasar dapat dihitung dengan rumus:

- Kecepatan potong:

$$v = \frac{\pi d n}{1000}; m / \min \quad (2.2)$$

dimana d = diameter rata-rata, yaitu

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

- Kecepatan pemakanan:

$$V_f = f \times n ; \text{mm/min} \quad (2.4)$$

- Waktu pemotongan:

$$t_c = l_t / v_f ; \text{min} \quad (2.5)$$

Sudut potong utama yaitu merupakan sudut antara mata potong mayor dengan kecepatan pemakanan v_f . Besarnya sudut tersebut ditentukan oleh geometri pahat dan cara pemasangan pahat pada mesin perkakas. Untuk harga a dan f yang tetap, maka sudut ini menentukan besarnya lebar pemotongan (b , *width of cut*) dan tebal geram sebelum terpotong (h , *undeformed chip thickness*) sebagai berikut:

- Lebar pemotongan :

$$b = a / \sin K_r ; \text{mm} \quad (2.6)$$

- Tebal geram sebelum terpotong :

$$h = f \sin K_r ; \text{mm} \quad (2.7)$$

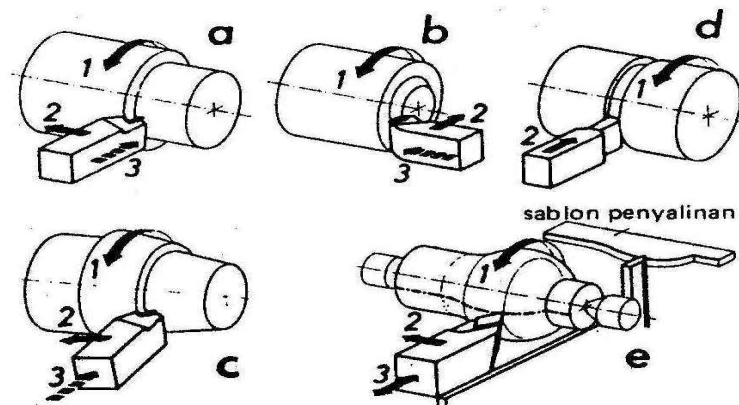
Dengan demikian, penampang geram sebelum terpotong dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A = f \times a = b \times h ; \text{mm}^2 \quad (2.8)$$

Dalam proses bubut terdapat beberapa jenis pembubutan menurut arah gerak laju, yakni:

1. Pembubutan memanjang (Gambar 2.3a) : gerak laju pemotongan berlangsung sejajar dengan sumbu putaran. Dalam hal ini proses pembubutan berlangsung pada bidang luar benda kerja.
2. Pembubutan membidang (Gambar 2.3b) : gerak pemotongan berlangsung tegak lurus terhadap sumbu putaran. Dengan proses ini dihasilkan bidang rata terhadap sumbu putaran.

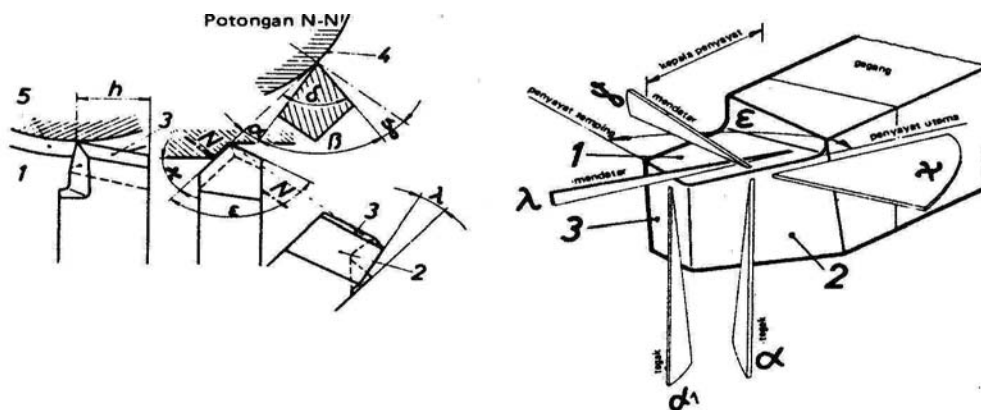
3. Jika gerak pembubutan berlangsung menyudut atau miring terhadap sumbu putaran, maka dihasilkan benda kerja yang berbentuk kerucut (Gambar 2.3c).
4. Pembubutan alur dapat dilakukan dengan gerak pemotongan tegak lurus terhadap sumbu putaran (Gambar 2.3d). Dimana dalam hal ini, pahat yang digunakan berbeda dengan proses pembubutan membidang.
5. Dengan gerak pembubutan sejajar dan tegak lurus terhadap sumbu putaran pada saat yang sama, akan dihasilkan benda bulat atau benda rotasi lainnya (Gambar 2.3e).



Gambar 2.3 Jenis pembubutan menurut arah gerak laju

Sumber: Pengerjaan Logam Dengan Mesin, 1985

2. Pahat bubut



Gambar 2.4 Sudut-sudut pada pahat bubut.

Sumber: Pengerjaan Logam Dengan Mesin, 1985

Sudut pahat diukur pada saat pahat bubut yang sedang tidak dipakai dan diukur pada waktu pembuatan dan pemeliharaan. Sudut-sudut pahat terpenting ialah sudut pasak β , sudut serpih γ dan sudut bebas α .

Sudut pasak β merupakan sudut terpenting pada pembentukan geram. Suatu penyayat dengan sudut pasak yang kecil mudah membenam kedalam bahan dan hanya memerlukan gaya potong yang kecil. Penyayat yang kecil (sudut pasak kecil) dapat dipakai untuk bahan kerja yang lunak.

Sudut serpih γ mempengaruhi pembentukan geram dan gaya potong. Pada sudut potong yang kecil, geram dibelokkan keatas bidang serpih secara drastis sehingga gaya potong meningkat. Makin besar sudut potong, maka makin mudah geram dibelokkan dan disingkirkan. Peningkatan sudut potong menyebabkan pengecilan sudut pasak yang mengakibatkan pengurangan gaya pemotongan. Untuk bahan yang padat, keras dan rapuh, sudut potong harus kecil (contohnya pada pembubutan baja tuang, baja yang diperkeras).

Sudut bebas α mempengaruhi gesekan antara bidang potong benda kerja dengan bidang bebas perkakas. Jika sudut bebas kecil, maka gesekan bertambah. Hal ini mengakibatkan pemanasan yang lebih tinggi dan mempercepat keausan pahat. Oleh karena itu jumlah sudut-sudut pahat ($\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$), maka sudut bebas yang terlalu besar memperkecil sudut pasak atau sudut serpih, sebagaimana pula halnya dengan kenyataan bahwa perubahan satu sudut mengakibatkan perubahan salah satu atau kedua sudut lainnya.

Selama pembubutan berlangsung dititik beratkan pada optimasi geometri pahat bubut, sebab fungsi suatu pahat dalam kebanyakan hal akan sama dan tidak tergantung dari jenis pahat. Sudut pahat hanya ditinjau dalam sistem referensi ortogonal karena dalam sistem referensi yang lain efeknya akan sama. Sudut efektif tidak selalu sama dengan sudut pasif, tergantung pada cara pemasangan pahat pada mesin perkakas dan kondisi pemotongan yang dipilih. Dengan demikian perencanaan proses atau operator mesin masih mempunyai kebebasan untuk mendeteksi harga sudut yang dimaksud disesuaikan dengan jenis pahat yang tersedia. Referensi ortogonal yang dimaksud adalah :

- Sudut bebas orthogonal, α_o
- Sudut geram orthogonal, γ_o
- Sudut miring, λ_s
- Sudut potong utama, K_r
- Sudut potong bantu, K'_r
- Radius pojok, r_e

2.1 Sudut Potong Utama

Sudut potong utama mempunyai peran antara lain:

- Menentukan lebar dan tebal geram sebelum terpotong (b dan h)
- Menentukan panjang mata potong yang aktif atau panjang kontak antara geram dengan bidang pahat
- Menentukan besarnya gaya radial F_x

Untuk kedalaman potong a dan gerak makan f yang tetap, maka dengan memperkecil sudut potong utama akan menurunkan tebal geram sebelum terpotong h dan menaikkan lebar geram b, sebagai rumus berikut:

$$h = f \sin K_r \quad (2.9)$$

$$b = a / \sin K_r \quad (2.10)$$

Tebal geram h yang kecil secara langsung akan menurunkan temperatur pemotongan, sedang lebar geram b yang besar akan mempercepat proses perambatan panas pada pahat sehingga temperatur pahat akan relatif rendah. Dengan demikian umur pahat akan lebih tinggi atau dengan kata lain kecepatan potong dapat lebih dipertinggi untuk menaikkan kecepatan produksi. Akan tetapi, pemakaian sudut potong utama yang kecil tidak selalu menguntungkan sebab akan menaikkan gaya radial F_x .

Gaya radial yang besar mungkin menyebabkan lenturan yang terlalu besar ataupun getaran sehingga menurunkan ketelitian geometrik produksi dan hasil pemotongan terlalu kasar. Tergantung pada kekakuan benda kerja dan pahat serta metode pencekam benda kerja serta sudut akhir atau geometri benda kerja, maka operator mesin dapat memilih pahat dengan sudut K_r yang cocok atau dengan

Pahat bubut tusuk dalam untuk membuat alur.

Pahat bubut ulir dalam untuk membuat ulir mur.

2.2 Bahan-bahan untuk perkakas bubut.

Sebagai prinsip dasar berlaku bahwa tiada mesin yang dapat melampaui kemampuan perkakasnya. Di dalam upaya meningkatkan daya potong, telah ditentukan bahan baku untuk penyayat yang memungkinkan kecepatan sayat yang lebih tinggi. Akan tetapi kecepatan sayat yang telah ditingkatkan memerlukan pula mesin bubut yang lebih kuat dan perlengkapan pelayanan yang lebih untuk menghemat waktu, sehingga muncul serangkaian perkembangan yang cepat dan saling mempengaruhi.

Sifat-sifat bahan yang mutlak perlu untuk penyayat pahat bubut.

1. Kekerasan : pahat harus lebih keras dari bahan benda kerja karena jika tidak demikian, pahat tidak akan dapat menyayat benda kerja.
2. Kekerasan panas : akibat adanya gesekan maka timbul panas, yang dapat menimbulkan suhu tinggi pada lokasi penyayatan. Pahat harus tetap bertahan pada suhu yang tinggi, karena jika tidak hal ini akan menyebabkan pahat cepat aus.
3. Keuletan : walaupun sudah memenuhi persyaratan kekerasan yang mutlak, pahat masih harus mampu menahan beban hentakan dan pahat tidak boleh patah.
4. Daya tahan aus : Pahat akan aus akibat beban gesekan dan akan menjadi tumpul. Oleh karena pengasahan pahat yang terlalu sering akan menimbulkan kerugian bahan dan waktu, maka daya tahan aus bahan pahat harus tinggi.

2.3 Sifat-sifat Material Pahat *HSS*

High Speed Steel adalah baja paduan yang mengalami proses laku panas (*Heat Treatment*) sehingga kekerasannya menjadi cukup tinggi dan tahan terhadap temperatur tinggi tanpa menjadi lunak (*annealed*). *HSS* juga dapat digunakan untuk pemotongan dengan kedalaman potong yang lebih besar pada kecepatan potong yang lebih tinggi dibandingkan dengan pahat baja karbon. Apabila telah

mengalami keausan, pahat *HHS* dapat diasah kembali. Karena keuletan yang relatif baik maka sampai saat ini berbagai jenis *HSS* masih tetap digunakan.

Hot Hardness dan *recovery hardness* yang cukup tinggi pada *HSS* dapat dicapai berkat adanya unsur paduan *W*, *Cr*, *V*, *Mo*, dan *Co*. Pengaruh unsur-unsur tersebut pada unsur dasar besi (*Fe*) dan karbon (*C*) adalah sebagai berikut:

- *Tungsten* atau *Wolfram* (*W*) : mempertinggi *hot hardness*, dengan membentuk (Fe_4W_2C) yang menyebabkan kenaikan temperatur untuk proses *hardening* dan *tempering*.
- *Chromium* (*Cr*) : menaikkan *hardenability* dan *hot hardness*.
- *Vanadium* (*V*) : menurunkan sensitivitas terhadap *overheating* serta menghaluskan besar butir.
- *Molybdenum* (*Mo*) : mempunyai efek yang sama seperti *W* tetapi lebih sensitif terhadap *overheating*, serta lebih liat.
- *Cobalt* (*Co*) : untuk menaikkan *hot hardness* dan tahan keausan.

3. Kebulatan

Dalam mesin-mesin atau peralatan teknis lainnya banyak sekali ditemukan komponen-komponen yang mempunyai penampang bulat, baik berupa poros, bantalan, roda gigi dengan dimensi kecil seperti halnya pada jam tangan sampai dengan komponen yang berdimensi besar.

Komponen dengan kubulatan ideal amat sulit dibuat, dengan demikian kita harus mentolerir adanya ketidak bulatan dalam batas-batas titik sesuai dengan tujuan atau fungsi dari komponen itu. Kebulatan mempunyai peranan penting dalam hal:

- Membagi beban sama rata
- Menentukan umur komponen
- Menentukan kondisi suaian
- Menentukan ketelitian putaran
- Memperlancar pelumasan

3.1 Persyaratan Pengukuran Kebulatan

Kebulatan dan diameter adalah dua karakter geometris yang berbeda, meskipun demikian keduanya saling berkaitan, ketidak bulatan akan mempengaruhi hasil pengukuran diameter, sebaliknya pengukuran diameter tidak selalu akan menunjukkan ketidak bulatan. Sebagai contoh, penampang-penampang poros dengan dua tonjolan beraturan (ellips) akan dapat diketahui kebulatannya bila diukur dengan sensor dengan posisi bertolak belakang (180°), misalnya dengan mikrometer. Akan tetapi mikrometer tidak dapat menunjukkan ketidakbulatan bila digunakan untuk mengukur penampang poros dengan jumlah tonjolan beraturan ganjil (3, 5, 7 dan sebagainya). Tonjolan ganjil dengan jumlah dibawah 10 tidak dapat dilakukan pengukuran dengan *dial indicator*, karena akan mempengaruhi dari jarak ukur dari titik pusat dan juga ada beberapa bagian tidak dapat disentuh oleh jarum pengukur *dial indicator*.

Pengukuran kebulatan dari poros tersebut adalah dengan cara meletakkan pada blok V dan kemudia memutarnya dengan menempelkan sensor jam ukur di atasnya, hal ini merupakan cara klasik untuk mengetahui kebulatan. Bila penampang poros berbentuk *ellips* maka jarum ukur tidak dapat menunjukkan penyimpangan yang berarti. Hal ini menunjukkan bahwa sewaktu benda ukur diputar di atas blok V terjadi perpindahan pusat benda ukur, sehingga jarak perpindahan sensor jam ukur akan dipengaruhi.

3.2 Alat Ukur Kebulatan

Berdasarkan putarannya, maka alat ukur dapat di klasifikasikan menjadi dua, yaitu:

1. Jenis dengan sensor putar
2. Jenis dengan meja putar

Ciri-ciri dari kedua jenis tersebut adalah:

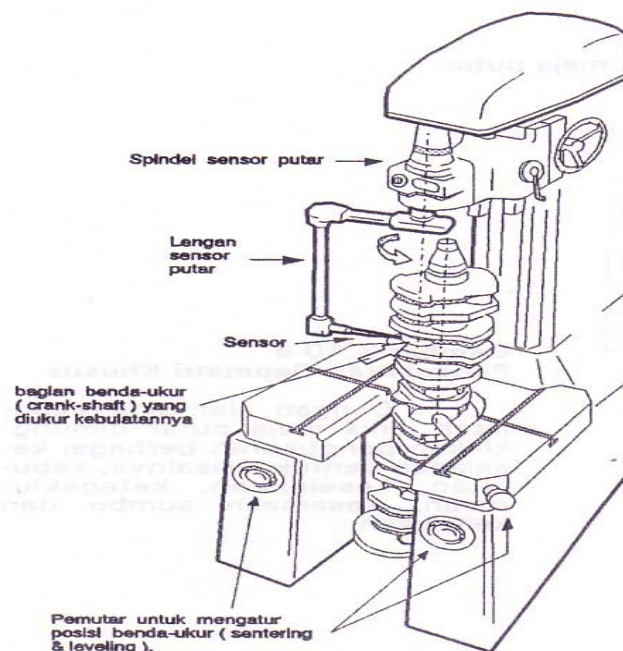
Jenis dengan sensor putar:

- Spindel (poros utama) yang berputar hanya menerima beban yang ringan dan tetap. Dengan demikian ketelitian yang tinggi bisa dicapai dengan membuat konstruksi yang cukup ringan.

- Meja untuk meletakkan benda ukur tidak mempengaruhi sistem pengukuran. Benda ukur yang besar dan panjang tidak merupakan persoalan.

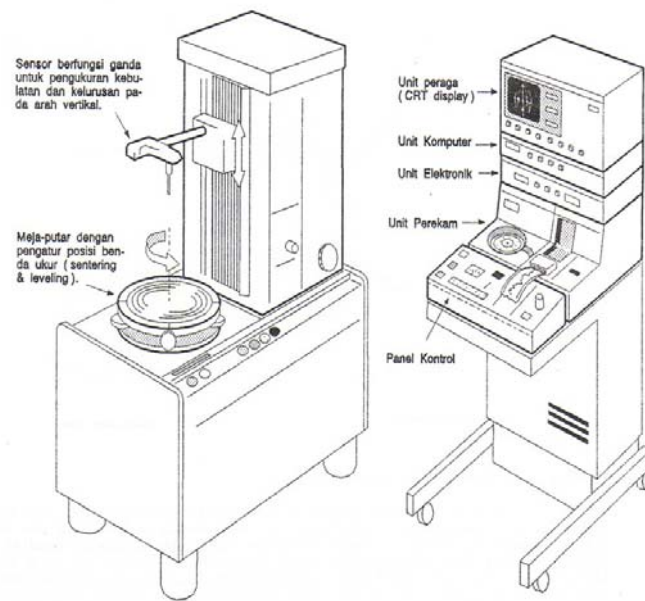
Jenis dengan meja putar:

- Karena sensor tidak berputar, maka berbagai pengukuran dengan kebulatan pengukuran dengan kebulatan dapat dilaksanakan, misalnya konsentris, kelurusan, kesejajaran dan ketegaklurusan.
- Berat benda ukur terbatas, karena keterbatasan kemampuan spindel untuk menahan beban. Penyimpangan letak titik berat benda ukur relatif terhadap sumbu putar dibatasi.



Gambar 2.6 Alat ukur kebulatan jenis sensor putar

Sumber: Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik, Taufiq Rochim 2001



Gambar 2.7 Alat ukur kebulatan jenis meja putar

Sumber: Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik, Taufiq Rochim 2001

3.3 Lingkaran Referensi

Menurut standar Inggris, Amerika dan Jepang, ada empat macam lingkaran referensi yaitu:

1. Lingkaran luar minimum (*Minimum Circumscribed Circle*)

Lingkaran terkecil yang mungkin dibuat diluar profil kebulatan tanpa memotongnya. Ketidak bulatan sama dengan jarak radial dari lingkaran tersebut kelekukan yang paling dalam.

2. Lingkaran dalam maksimum (*Maximum Inscribed Circle*)

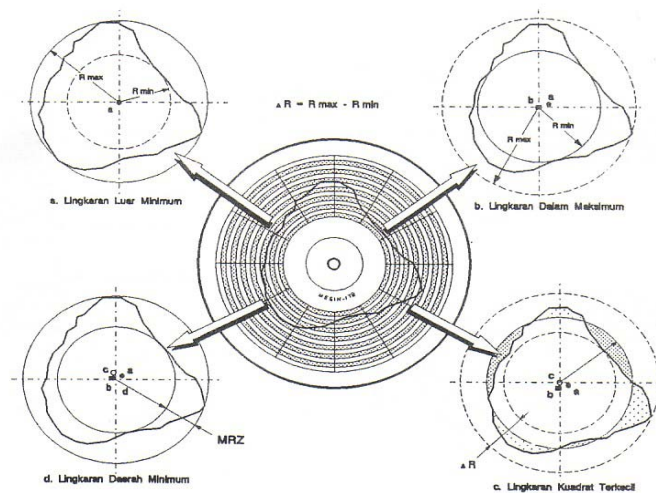
Lingkaran terbesar yang mungkin dibuat dalam profil kebulatan tanpa memotongnya. Ketidak bulatan sama dengan jarak radial dari lingkaran tersebut ke tonjolan yang paling tinggi.

3. Lingkaran daerah minimum (*Minimum Zone Circle*)

Dua buah lingkaran kosentris yang melingkupi profil kebulatan sedemikian rupa sehingga jarak radial antara kedua lingkaran tersebut adalah yang paling kecil. Titik tengah dari lingkaran daerah minimum disebut dengan MZC atau *Minimum Zone Center*. Ketidak bulatan merupakan selisih dari jari-jari kedua lingkaran tersebut dan dinamakan MRZ atau *Minimum Radial Zone*.

4. Lingkaran kuadrat terkecil (*Least Square Circle*)

Merupakan lingkaran yang ditentukan berdasarkan profil kebulatan sedemikian rupa sehingga kuadrat jarak dari sejumlah titik dengan interval sudut yang sama pada profil kebulatan ke lingkaran referensi adalah yang paling kecil. Titik tengah lingkaran kuadrat terkecil dinamakan LSC (*Least Square Center*). Jarak radial harga mutlak rata-rata antara profil kebulatan dengan lingkaran kuadrat terkecil disebut MLA (*Mean Line Average*).

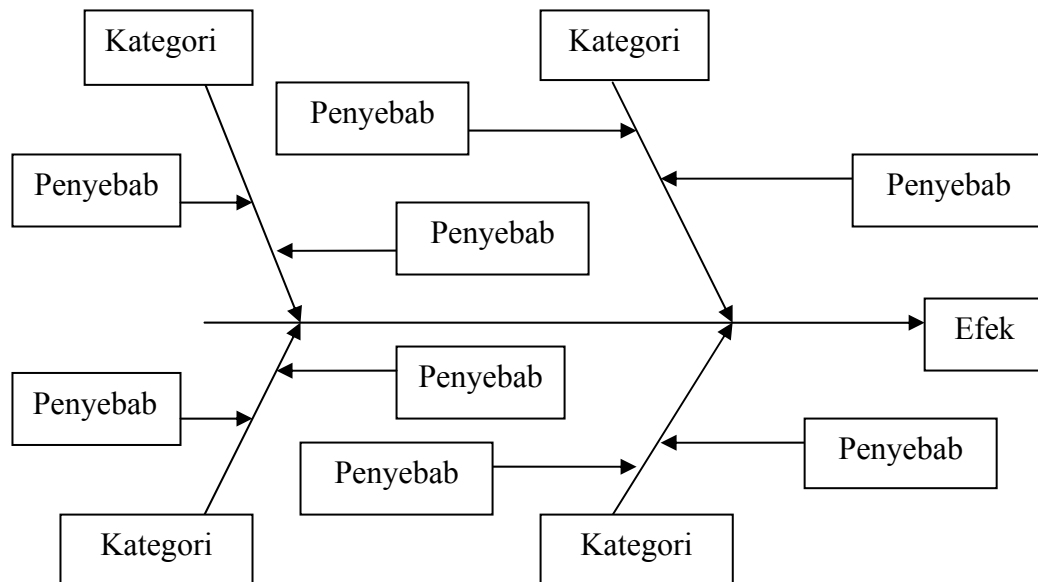


Gambar 2.8 Lingkaran referensi

Sumber: Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik, Taufiq Rochim 2001

4. Diagram Sebab Akibat

Diagram sebab akibat adalah diagram yang menjelaskan hubungan antara sebab dan akibat dalam suatu proses. Diagram sebab akibat ini berguna untuk menyelidiki secara sistematis penyebab dari suatu efek yang mempengaruhi hasil suatu proses. Efek yang mempengaruhi dapat bernilai “baik” dan juga dapat bernilai “buruk”. Dengan mengetahui sebab-sebab dari efek yang terjadi diharapkan hasil proses bisa diperbaiki dengan merubah faktor terkontrol dari suatu proses.



Gambar 2.9 Diagram tulang ikan

Sumber : *Introduction to statistical quality control*

Fungsi dari diagram tulang ikan adalah:

- Standarisasi dari proses yang sudah ada dan yang sedang direncanakan.
- Eliminasi kondisi yang menyebabkan kesalahan produksi.
- Menganalisa secara aktual kondisi proses dengan tujuan memperbaiki kualitas, efisiensi penggunaan sumber daya dan penghematan dana.
- Pendidikan dan pelatihan bagi operator dalam pengambilan keputusan dan perbaikan proses secara aktif.

5. Desain Eksperimen

Secara umum suatu eksperimen dapat diartikan sebagai sebuah atau sekumpulan tes yang dilakukan melalui percobaan-percobaan yang terencana, baik terhadap variabel *input* dari suatu proses atau sistem sehingga kita dapat menyelidiki dan mengetahui penyebab dari perubahan-perubahan *output* sebagai respon dari eksperimen tersebut. Pada umumnya eksperimen digunakan untuk

mempelajari kinerja dari proses atau sistem yang biasanya divisualisasikan seperti kombinasi mesin, metode, orang dan bahan baku yang mempengaruhi proses perubahan *input* menjadi *output*. Pendekatan statistik digunakan untuk aplikasi pada proses eksperimen ini.

Tujuan dari eksperimen yang dilakukan meliputi:

- Menentukan variabel mana yang berpengaruh pada respon y .
- Menentukan pengatur suatu harga x yang berpengaruh, sehingga y hampir selalu berada disekitar nilai yang dikehendaki.

Disamping itu, eksperimen yang dilakukan juga memberikan informasi tambahan mengenai pengaturan suatu harga x yang mempengaruhi variabilitas dalam y dan meminimalkan variabel tak terkontrol (z).

Desain eksperimen adalah alat penting dalam dunia teknik untuk meningkatkan kinerja dari proses produksi. Selain itu, proses-proses produksi baru juga dikembangkan dengan aplikasi desain eksperimen. Penerapan teknik-teknik desain eksperimen pada awal pengembangan proses produksi memberikan beberapa manfaat:

- Memperbaiki hasil proses.
- Mengurangi variabilitas dan lebih mendekati nilai target yang diinginkan.
- Mengurangi waktu pengembangan (*development time*).
- Mengurangi biaya keseluruhan (*overall cost*).

Desain eksperimen juga digunakan sebagai metode dalam membuat suatu desain untuk produk baru atau memperbaiki yang sudah ada. Beberapa aplikasi dari metode desain eksperimen dalam hal dunia teknik antara lain:

- Evaluasi dan perbandingan dari beberapa konfigurasi desain dasar.
- Evaluasi dari beberapa alternatif bahan baku.
- Pemilihan dan penentuan parameter desain sehingga produk akan mempunyai ketahanan kerja pada berbagai kondisi lapangan yang bervariasi dengan luas.

Aspek eksperimen, terbagi atas desain eksperimen dan analisa statistik data. Desain eksperimen merupakan proses perencanaan eksperimen atau percobaan untuk mengumpulkan data yang tepat sehingga dapat dilakukan analisa dengan

menggunakan metoda statistik. Kesimpulan yang diperoleh akan bersifat obyektif dan valid.

Tiga prinsip dasar dari desain eksperimen adalah:

- Replikasi yang merupakan pengulangan observasi, yang memiliki dua properti penting yaitu memberikan estimasi dari *error* eksperimen dan mendapatkan perkiraan efek dari suatu faktor dengan lebih presisi.
- Randomisasi yang merupakan pengacakan eksperimen yang dimana urutan percobaan yang akan dilakukan secara acak, yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kesalahan *input* secara *continue*.
- *Blocking* yang merupakan teknik yang berguna untuk meningkatkan kepresisian suatu eksperimen dengan mengalokasikan unit-unit eksperimen ke dalam beberapa hal blok, karena unit-unit eksperimen dalam suatu blok relatif bersifat homogen dan dapat dibandingkan antara blok satu dengan blok lainnya.

Langkah penuntun untuk melakukan desain eksperimen adalah:

- Mengetahui tujuan yang akan dilakukan.
- Pemilihan faktor, *level* dan *range*.
- Pemilihan variabel respon
- Pemilihan desain eksperimen.
- Pelaksanaan eksperimen.
- Analisa statistik data.
- Kesimpulan dan saran.

Ada beberapa hal yang dipakai di dalam desain eksperimen, antara lain:

- Faktor : variabel-variabel bebas yang nantinya akan mempengaruhi hasil eksperimen.
- Level faktor : tingkatan nilai dari suatu faktor.
- Interaksi : merupakan perbedaan efek dari suatu faktor terhadap faktor yang lain, nilainya sama dan berpengaruh satu sama lainnya.
- Replikasi (*n*) : menyatakan jumlah observasi yang dilakukan pada satu kombinasi perlakuan.
- Efek faktor : perubahan respon dari *level* yang berada dari suatu faktor.

- Run (N) : merupakan jumlah kombinasi yang harus dipenuhi dalam suatu perancangan.
- Respon : menyatakan hasil pengamatan yang diperoleh dari penelitian dan pengukuran yang biasanya dilambangkan dengan y .

6. Analisa Variansi (ANOVA)

Analisis variansi adalah suatu metode yang digunakan untuk menyelidiki pengaruh dari beberapa parameter yang telah ditentukan terhadap suatu respon tertentu. Metode ini sering dipakai untuk menganalisa data-data yang diperoleh dari beberapa parameter yang telah ditentukan terlebih dahulu. Efek dari parameter-parameter tersebut dapat berdiri sendiri maupun kombinasi dari parameter-parameter yang telah ditentukan.

Pengujian secara statistik adalah suatu pernyataan mengenai faktor yang mengikuti suatu distribusi probabilitas tertentu. Faktor yang di uji dibandingkan dengan suatu nilai yang tertentu atau faktor yang sama pada *level* yang berbeda.

$$H_0 : \theta_1 = \theta_2$$

$$H_1 : \theta_1 \neq \theta_2$$

Dimana : θ = faktor yang diuji

H_0 = hipotesa nol (hipotesa yang diinginkan)

H_1 = hipotesa alternatif

Pengujian hipotesa dapat juga menggunakan hipotesa alternatif dua sisi, yaitu:

$$H_1 : \theta_1 < \theta_2 \text{ atau } H_1 : \theta_1 > \theta_2$$

Dari pengujian hipotesa ini dilakukan uji statistik sehingga dapat ditarik kesimpulan untuk menolak atau gagal menolak H_0 . Pada *anova*, untuk mengetahui apakah suatu faktor memberikan efek yang signifikan terhadap respon, dilakukan uji hipotesa dalam bentuk *F-test* dan menghitung persentase kontribusi.

Hasil dari uji hipotesa akan menyatakan untuk menolak atau gagal menolak H_0 pada nilai α tertentu. Seringkali pernyataan ini tidak cukup memuaskan, karena tidak dapat diketahui sejauh mana perbedaan nilai yang terjadi. Untuk mengatasi masalah ini, pendekatan *P-value* digunakan. *P-value* merupakan nilai α yang terkecil dimana dihasilkan kesimpulan untuk menolak H_0 .

Derajat kebebasan (*degree of freedom* atau v) adalah angka yang menunjukkan jumlah perbandingan independen (suatu *level* dari suatu faktor terhadap *level* lainnya) yang dapat dilakukan. Seperti *sum of squares*, derajat kebebasan ada lima macam dengan hubungan matematis sebagai berikut:

$$V_T = V_m + V_t \quad (2.11)$$

$$= V_m + V_{\text{treatment}} + V_e \quad (2.12)$$

Sum of squares (SS), atau jumlah dari kuadrat adalah hasil perhitungan pertama dalam *anova*, dimana dikenal:

- $SS_T = \text{total sum of squares}$
- $SS_m = \text{sum of squares due to mean}$
- $SS_e = \text{sum of squares due to error}$
- $SS_t = \text{total corrected sum of squares}$
- $SS_{\text{treatment}} = \text{sum of squares due to treatment}$

Hubungan matematis dari lima macam *sum of squares* diatas adalah sebagai berikut:

$$SS_T = SS_m + SS_t \quad (2.13)$$

$$= SS_m + SS_{\text{treatment}} + SS_e \quad (2.14)$$

Variansi atau ukuran dari penyebaran atau derajat kecenderungan penyebaran data numerik dari harga rata-ratanya, dalam *anova* dikenal dengan istilah *mean square* (nilai kuadrat rata-rata) diperoleh dari *sum of square* dibagi dengan derajat kebebasan. Berikut rumus matematisnya:

$$MS_x = \frac{SS_x}{v_x} \quad (2.15)$$

F-ratio adalah perbandingan antara *mean square* dari suatu faktor penyebab variansi ($MS_{\text{treatment}}$) dengan variansi dari *error* (MS_e). Sebagai analisa awal, makin besar *F-ratio* suatu faktor atau suatu interaksi (F_{ox}), maka signifikan pengaruh faktor atau interaksi tersebut terhadap respon (y).

$$F_o = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MS_e} \quad (2.16)$$

Dengan mengetahui nilai F_0 maka langkah selanjutnya adalah melakukan *F-test* dengan membandingkan nilai F_0 dengan nilai *F-ratio* yang didapatkan dari tabel distribusi F. Uji ini untuk melihat signifikansi pengaruh faktor atau interaksi terhadap respon dalam nilai α yang telah ditentukan. Nilai α berkaitan erat dengan adanya tingkatan kepercayaan (*confidence level* atau *confidence coefficient* atau *CL*), hubungan matematisnya:

$CL = 1 - \alpha$; dimana biasanya nilai α yang umum digunakan adalah 5%.

Pada desain eksperimen, dikenal dengan adanya *alpha-error*, keduanya semaksimal mungkin diminimalkan. Kesalahan analisa dalam desain eksperimen dengan menerima efek faktor yang tidak signifikan sebagai efek faktor yang signifikan adalah merupakan *alpha-error*. Sedangkan kesalahan analisa yang menerima faktor yang tidak signifikan dianggap sebagai *beta-error*.

Jika nilai $F_0 > F_{tabulated}$ maka efek suatu faktor akan signifikan terhadap respon. Untuk itu $F_{tabulated}$ dicari dengan pedoman tiga hal, yaitu:

- Nilai α
- Derajat kebebasan dari *numerator* (sumber variansi yang bersangkutan)
- Derjat kebebasan dari *denominator* (MS_e)

Format dari $F_{tabulated}$ adalah $F_{\alpha, v1, v2}$, dimana $v1$ adalah derajat kebebasan *numerator* dan $v2$ adalah derajat kebebasan dari *denominator*.

Keterbatasan dalam penggunaan *F-test* adalah:

- Asumsi konstannya MS_e untuk semua sumber variansi.
- Adanya α yang memungkinkan terjadinya *alpha error*
- Pengambilan keputusan dalam teknik *pooling-up* dimana terjadi pengurangan faktor untuk menyederhanakan desain eksperimen.

Untuk mengantisipasi, keterbatasan dari *F-test* ini maka dengan menghitung persentase kontribusi (ρ). Persentase kontribusi memberikan data numerik mengenai kontribusi suatu faktor dalam memberikan efek terhadap respon.

Dalam perhitungan persentase kontribusi, dikenal *sum of squares of deviation from target* (SS_d). target disini adalah hasil yang diinginkan pada respon (m). jadi SS_d adalah penjumlahan dari kuadrat hasil observasi (y) dikurangi dengan target.

$$SS_{treatment'} = SS_{treatment} - v_{treatment} \cdot MS_e \quad (2.17)$$

Persen kontribusi didapatkan dengan rumus:

$$\rho_{treatment} = \frac{SS_{treatment}}{SS_t} \times 100\% \quad (2.18)$$

$$\rho_e = \frac{SS_e}{SS_t} \times 100\% \quad (2.19)$$

Jika $\rho_e \leq 15\%$ maka diasumsikan tidak ada faktor yang penting terlewatkan, tetapi bila $\rho_e \geq 50\%$ maka diasumsikan ada beberapa faktor penting terlewatkan.

6.1 Desain Faktorial Dengan Level Campuran

Pada desain faktorial, semua kemungkinan kombinasi tiap *level* dari faktor-faktor dapat diselidiki secara lengkap. Tiap faktor yang berdiri sendiri memberikan efek yang disebut efek utama atau *main effect*, sedangkan efek yang ditimbulkan oleh beberapa faktor yang saling berkaitan disebut efek interaksi atau *interaction effect*.

Pada desain faktorial, setidaknya harus dilakukan paling tidak dua replikasi untuk menentukan SS_e , dan jika semua kemungkinan interaksi masuk dalam model perhitungan.

Misalkan ada tiga faktor A, B dan C yang digunakan dalam desain faktorial. Faktor A mempunyai jumlah *level* a , faktor B mempunyai jumlah *level* b dan faktor C mempunyai jumlah *level* c . Jumlah replikasi yang harus dilakukan adalah n . Jumlah observasi N adalah:

$$N = a \times b \times c \times n \quad (2.20)$$

Tabel 2.1 *Anova* Untuk Desain Eksperimen Tiga Faktor

Sumber Variasi	v	SS	MS	F
A	a-1	SS_A	MS_A	MS_A / MSe
B	b-1	SS_B	MS_B	MS_B / MSe
C	c-1	SS_C	MS_C	MS_C / MSe
AB	(a-1)(b-1)	SS_{AB}	MS_{AB}	MS_{AB} / MSe
AC	(a-1)(c-1)	SS_{AC}	MS_{AC}	MS_{AC} / MSe
BC	(b-1)(c-1)	SS_{BC}	MS_{BC}	MS_{BC} / MSe
ABC	(a-1)(b-1)(c-1)	SS_{ABC}	MS_{ABC}	MS_{ABC} / MSe
Error	abc(n-1)	SS_e	Mse	
Total	abcn-1	SS_t		

Untuk perhitungan *anova*:

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y^2_{ijk} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (2.21)$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y^2_{i\dots} - \frac{y^2}{abcn} \quad (2.22)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y^2_{j\dots} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (2.23)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y^2_{k\dots} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (2.24)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y^2_{ij\dots} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (2.25)$$

$$= SS_{subtotal} - SS_A - SS_B \quad (2.26)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y^2_{ik\dots} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C \quad (2.27)$$

$$= SS_{subtotal} - SS_A - SS_C \quad (2.28)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y^2_{jk\dots} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_B - SS_C \quad (2.29)$$

$$= SS_{subtotal} - SS_B - SS_C \quad (2.30)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y^2_{ijk} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.31)$$

$$= SS_{subtotal} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.32)$$

$$SS_{Error} = SS_{total} - SS_{subtotal(ABC)} \quad (2.33)$$

Untuk mengetahui apakah variabilitas dari respon benar-benar disebabkan oleh faktor dan interaksi yang dipilih, maka perlu dihitung koefisien determinasi (R^2):

$$R^2 = \frac{SS_{model}}{SS_t} \quad (2.34)$$

$$SS_{model} = SS_{treatment} + SS_{interaction} \quad (2.35)$$

Jika harga koefisien determinasi ini semakin besar berarti pemilihan model pada desain eksperimen sudah sesuai dan persentase variabilitas respon yang

disebabkan oleh faktor dan interaksi yang dipilih dapat ditunjukkan dengan harga koefisien determinasi tersebut.

7. Regresi *Linear*

Regresi linear berfungsi untuk mengetahui suatu ramalan yang berdasarkan prediksi dari keterangan statistik. Hubungan dari fariabel-fariabel yang ada, biasanya ditulis dalam bentuk persamaan *linear*.

$$Y = \alpha + \beta x \quad (2.36)$$

Metode *least squares* berusaha membuat garis yang mempunyai jumlah selisih (jarak vertikal) kuadrat antara data dengan garis regresi yang terkecil. Metode ini ditemukan oleh *Andrian Legendre* seorang ahli matematika Perancis pada awal abad 19. Pada metode ini digunakan beberapa notasi-notasi dalam perhitungannya, antara lain:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (2.37)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i \quad (2.38)$$

$$S^2_x = \sum (x_i - \bar{y})^2 = \sum x_i^2 - n\bar{x}^2 \quad (2.39)$$

$$S^2_y = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - n\bar{y}^2 \quad (2.40)$$

$$S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum xy_i - n\bar{x}\bar{y} \quad (2.41)$$

$$SSE = S^2_y - \hat{\beta}^2 S^2_x = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta}x_i)^2 \quad (2.41)$$

$$Residuals = y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta}x_i \quad (2.42)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \quad (2.43)$$

$$\hat{\beta} = \frac{S_{xy}}{S^2_x} \quad (2.44)$$

$$s^2 = \frac{SSE}{(n-2)} \quad (2.45)$$

dimana: n adalah derajat kebebasan

$$s = \sqrt{s^2} \quad (2.46)$$

Dalam suatu hipotesa, dilakukan perhitungan nilai β dan α dengan menggunakan distribusi “t” yakni:

$$\beta = \hat{\beta} \pm t_{0.025} \frac{s}{S_x} \quad (2.47)$$

$$\alpha = \hat{\alpha} \pm t_{0.025} s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_x^2}} \quad (2.48)$$