

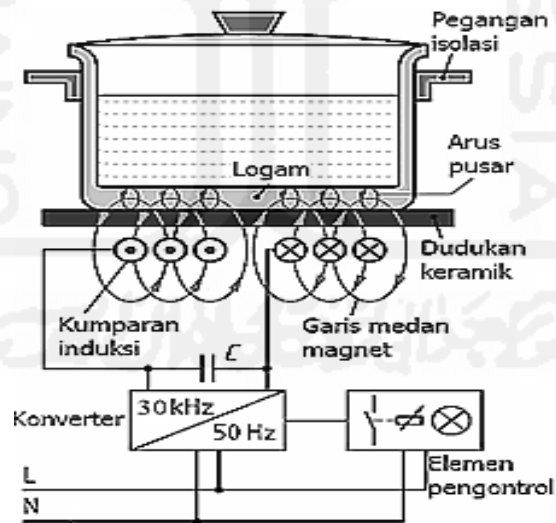
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kompor Induksi

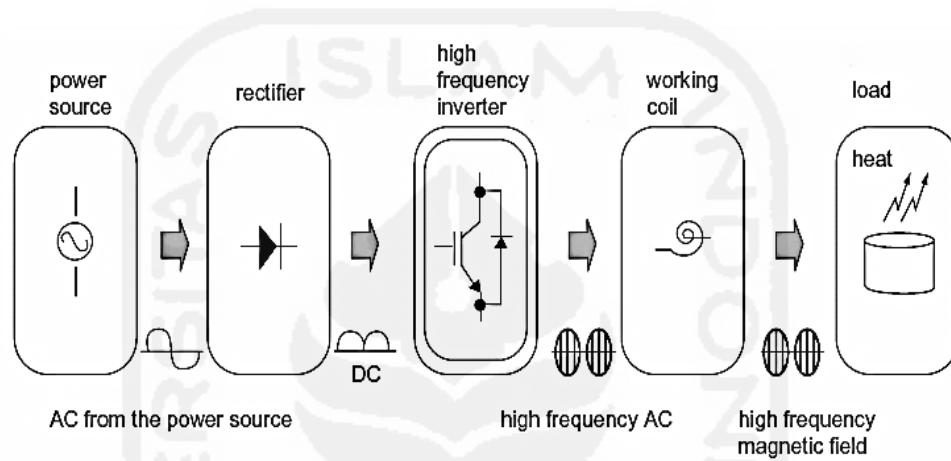
Kompor induksi adalah timbulnya panas pada logam yang terkena induk medan magnet, hal ini disebabkan karena pada logam timbul *eddy current* yang arahnya melingkar melingkupi medan magnet yang menembus logam hingga menyebabkan panas pada logam (Ridho'I, 2008).

Konsep dasar dari kompor pemanas induksi, dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.1. Kompor pemanas induksi.

Penerapan pemanas induksi pada sistem kompor induksi, dibuat dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Dimana teknik pemanasannya menggunakan bahan penghantar listrik. Prinsip dasar dari pemanas induksi, bahwa arus bolak-balik yang mengalir melalui suatu rangkaian mempengaruhi gerakan magnet rangkaian sekunder didekatnya (Zhulkarnaen, 2000).



Gambar 2.2. Blok diagram kompor pemanas induksi (sumber : Induction Heating, 2000).

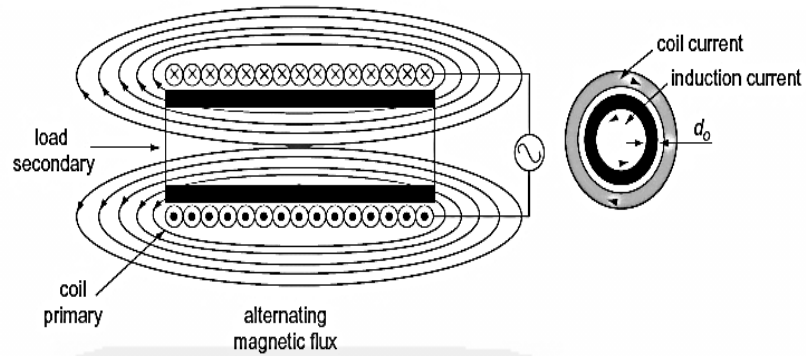
2.1.1. Cara Kerja.

Sumber AC disalurkan oleh rangkaian penyearah untuk memperoleh sumber DC, yang akan menjadi sumber arus DC pada rangkaian inverter frekuensi tinggi. Rangkaian inverter ini mengatur arus ke kumparan pemanas sehingga akan terbentuk medan magnet. Jika suatu benda konduktor diletakkan diatas medan magnet tersebut, maka akan muncul induksi tegangan dan terbentuk arus pusar (*eddy current*). Hal ini disebabkan karena pada logam timbul arus pusar

yang arahnya melingkar melingkupi medan magnet. Terjadinya arus pusar akibat dari induksi magnet yang menimbulkan fluks magnetik yang menembus logam, sehingga menyebabkan panas pada logam (Noviansyah, 2012).

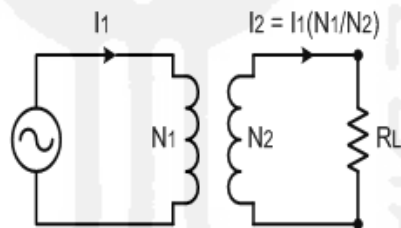
Sebuah sumber listrik digunakan untuk menggerakkan sebuah arus bolak balik atau yang biasa disebut sebagai arus AC yang besar melalui sebuah kumparan induksi. Kumparan induksi ini dikenal sebagai kumparan kerja. Aliran arus yang melalui kumparan ini menghasilkan medan magnet yang sangat kuat dan cepat berubah dalam kumparan kerja. Benda kerja yang akan dipanaskan ditempatkan dalam medan magnet ini dengan arus AC yang sangat kuat. Ketika sebuah beban masuk dalam kumparan kerja yang dialiri oleh arus AC, maka nilai arus yang mengalir akan mengikuti besarnya sesuai dengan nilai beban yang masuk (Pambudi, 2012).

Pada dasarnya cara kerja dari pemanas induksi hampir sama dengan transformator.

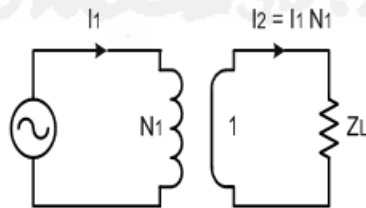


Gambar 2.3. Konsep dasar Pemanas induksi
(sumber : Induction Heating, 2000).

Pada gambar 2.3. merupakan konsep dasar yang terdiri dari gulungan pemanas induktif dan arus, yang menggambarkan induksi elektromagnetik dan efek kulit.



Gambar 2.4a. Rangkaian ekuivalen Transformator.



Gambar 2.4b. Lilitan sekunder hubung singkat.

Gambar 2.4a., merupakan bentuk sederhana dari transformator. Dimana arus sekunder menyesuaikan arus primer. Pada lilitan primer dan sekunder terdapat rugi-rugi yang disebabkan hambatan lilitan dan koefisien sebesar satu, dengan asumsi arus bocor magnet diabaikan. Gambar 2.4b., ketika gulungan sekunder hanya satu lilitan dan rangkaian terhubung singkat akan terjadi rugi-rugi panas yang substansial karena kenaikan arus pada beban (arus sekunder).

Dengan melakukan perubahan pada rangkaian pemanas induksi pada rangkaian inverter termasuk rangkaian resonansinya dan penambahan rangkaian pengatur keluaran panas, diperoleh rangkaian pensaklaran lebih dingin dengan besar panas yang dihasilkan pada keadaan yang sama. Dengan adanya rangkaian pengatur keluaran panas, dapat diatur energi panas yang maksimal sehingga efisiensi lebih tinggi (Rhoades, 2006).

Penerapan pemanas induksi pada sistem, dibuat dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Dimana teknik pemanasannya menggunakan bahan penghantar listrik. Prinsip dasar dari pemanas induksi, bahwa arus bolak-balik yang mengalir melalui suatu rangkaian mempengaruhi gerakan magnet rangkaian sekunder didekatnya. Rugi panas yang terjadi menjadikan masalah utama dari sistem tersebut. Sehingga rugi panas ini diupayakan untuk diminimalkan. Rugi panas yang terjadi pada proses induksi

elektromagnetik ini dapat dimanfaatkan sebagai energi panas dalam sistem pemanas listrik. Sehingga akan diperoleh efisiensi energi yang tinggi dari kompor induksi (Li Hao, dkk, 2009).

2.1.2. Pemanas Induksi.

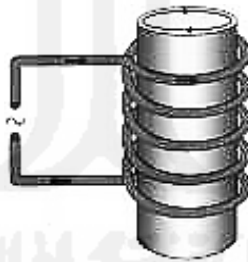
Efisiensi dari pemanas induksi ditentukan antara energi panas yang dihasilkan dengan daya input listrik yang digunakan. Untuk menaikkan efisiensi ada dua cara, yaitu dengan meminimalkan rugi-rugi energi dan memaksimalkan energi panas. Cara untuk meminimalkan rugi-rugi energi yaitu pada rangkaian konverter daya dan lilitan pada keluaran rangkaian konverter daya.

Tujuan yang paling penting dari pemanas induksi adalah untuk memaksimalkan pembangkitan energi panas pada gulungan sekunder, lubang kecil pada gulungan pemanas induktif dibuat kecil dan gulungan sekunder dibuat dari bahan dengan hambatan listrik yang kecil dengan permeabilitas yang tinggi. Bahan selain logam mengurangi efisiensi energi karena bahan tersebut memiliki hambatan listrik besar dan permeabilitas yang rendah (Pambudi, 2012).

Pemanas dengan induksi adalah kombinasi antara elektromagnetik dan perpindahan panas. Perpindahan panas dan elektromagnetik saling terkait erat karena sifat fisik bahan panas sangat tergantung pada intensitas medan magnet dan suhu. Tegangan

bolak-balik diterapkan ke kumparan induksi akan menghasilkan arus bolak-balik pada rangkaian kumparan yang akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini akan menginduksi pada benda kerja yang berada didekat kumparan. Arus ini memiliki frekuensi yang sama seperti arus pada kumparan, tetapi mempunyai arah berlawanan dengan arus kumparan. Arus ini menghasilkan panas oleh efek *Joule* (Callebaut, 2007) .

Sebuah sistem pemanas induksi yang terdiri dari beban silinder dikelilingi oleh kumparan induksi ditunjukkan pada Gambar 2.5. Karena beberapa fenomena elektromagnetik, distribusi arus di induktor dan benda kerja tidak sama. Sumber panas ini menyebabkan tidak meratanya temperatur dalam benda kerja.



Gambar 2.5. Sebuah sistem pemanas induksi konvensional terdiri dari beban silinder dikelilingi oleh kumparan induksi

(Sumber:: Valery, dkk, 2003)

2.1.3. Sistem Daya Kompor Induksi

Didalam sistem daya pada pemanas induksi, digunakan rangkaian konverter resonansi untuk membuat konversi energinya efisien dan meminimalkan rugi-rugi rangkaian pensaklarannya. Rangkaian inverter resonansi yang dipergunakan umumnya menggunakan rangkaian inverter resonansi seri (Rhoades, 2006).

Efisiensi dari kompor pemanas induksi ditentukan dari *ratio* antara energi panas yang dihasilkan dengan energi input listrik yang digunakan (Sadhu, 2012).

Untuk menghitung efisiensi energi, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\eta (\%) &= (Q_{out} / Q_{in}) \times 100 \dots\dots\dots(2.1) \\ &= \{(m_{air} \times C_{air} \times \Delta t) / (V \times I \times \rho F \times \Delta t)\} \times 100\end{aligned}$$

dimana,

Q_{out} : energi yang dikeluarkan (Joule)

Q_{in} : energi masukan (Joule)

m_{air} : massa jenis air (kg)

c_{air} : panas jenis air (J/kg.°C)

Δt : perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$)

V : tegangan masukan (Volt)

I : arus masukan (Ampere)

PF : *power factor*

ΔT : perubahan waktu (detik)

1 liter air (21°C) = 996,96 g \cong 1 kg

1 kal = 4,186 Joule

Panas jenis c dari sesuatu zat merupakan jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 gram zat itu sebanyak 1°C .

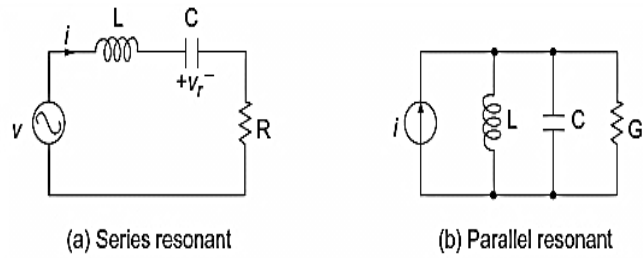
Untuk air, panas jenisnya sebesar:

$$c = \{0,9983 - 0,005184 (t/100) + 0,006912 (t / 100)^2\} \dots (2.2)$$

(Sumber: Valery, dkk, 2003).

2.2. Rangkaian Resonansi

Rangkaian pada konverter resonansi terdiri dari kapasitor, induktor dan resistor. Ada dua jenis rangkaian ini, yaitu rangkaian resonansi seri dan rangkaian resonansi paralel.



Gambar 2.6. Rangkaian Resonansi

(Sumber: Induction Heating, 2000).

Reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif dapat dihitung dengan persamaan (2.3.) dan persamaan (2.4.).

$$X_L = j\omega L = j2\pi fL \ (\Omega) \dots\dots\dots(2.3.)$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC} \ (\Omega) \dots\dots\dots(2.4.)$$

(Sumber: Induction Heating, 2000).

Pada frekuensi resonansi, harga reaktansi induktif pada persamaan (2.3.) dan harga reaktansi kapasitif pada persamaan (2.4.) memiliki harga yang sama, yaitu sebesar tegangan dari sumber daya dan arus pada rangkaian yang berada pada level yang sama. Untuk besar impedansi pada rangkaian resonansi seri dapat dihitung dengan persamaan (2.5.).

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \ (\Omega) \dots\dots\dots(2.5.)$$

Dimana : L = Lilitan

C = Capasitor

|Z| = Impedansi

R = Resistor

f_0 = Frekuensi Resonansi

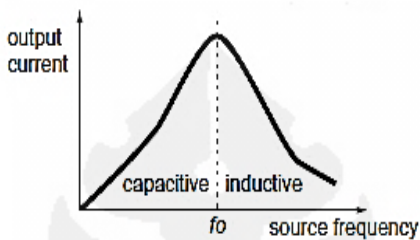
Frekuensi resonansi dapat dihitung dengan persamaan (2.6). Arus pada rangkaian akan mencapai puncak ketika frekuensi sumber sama dengan frekuensi resonansi dan akan turun jika frekuensi sumber lebih besar atau lebih kecil dari frekuensi resonansinya.

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz)} \dots\dots\dots(2.6.)$$

(Sumber : Induction Heating, 2000).

Pada kurva frekuensi diperlihatkan hubungan antara arus dan frekuensi sumber ketika tegangan sumber rangkaian resonansi dibuat sama. Arus dan output energi mencapai nilai maksimumnya pada frekuensi resonansi. Di daerah dimana frekuensi pensaklaran lebih rendah dari frekuensi resonansi, reaktansi induktif terhubung langsung dengan frekuensi pensaklaran. Dengan kata lain, semakin rendah frekuensi, semakin kecil reaktansi induktif. Dan menurut persamaan (2.4.), reaktansi kapasitip menjadi kebalikannya. Yaitu reaktansi akan

cenderung kapasitif sehingga keadaan menjadikan arus lebih tinggi daripada tegangan. Bila frekuensi pensaklaran meningkat, impedansi pada persamaan (2.5.) menjadi lebih besar, jumlah output energi akan membesar (gambar 2.7.). Pada situasi yang berlawanan, lebih rendah frekuensi pensaklaran menjadikan impedansi lebih kecil yang menyebabkan *output* energi berkurang.



Gambar 2.7. Kurva frekuensi
(sumber: Induction Heating , 2000).

2.3. Elektromagnetik Logam

Sifat elektromagnetik pada bahan mengacu pada jumlah karakteristik elektromagnetik termasuk permeabilitas magnetik, resistivitas listrik (konduktivitas listrik), kerapatan saturasi fluks, kekuatan koersif (*coercive force*), kerugian histeresis, permeabilitas awal, permitivitas, kutub magnetik, dan lainnya.

2.3.1. Sifat Elektromagnetik Pada Logam.

Sebuah konduktor yang dialiri arus diletakkan dalam medan magnet, merasakan gaya yang sebanding dengan kerapatan fluksi dan

magnetik. Jika arus I mengalir pada elemen dl , ditempatkan dalam medan magnet B akan mengalami gaya dF dengan rumus (2.8):

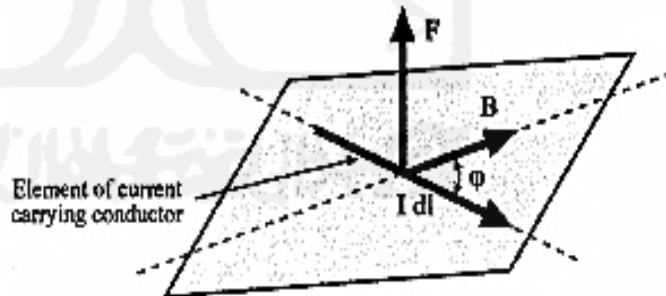
$$dF = I B dl = I B dl \sin\phi \dots\dots\dots(2.7.)$$

(Sumber: Valery,dkk, 2003)

di mana : F , I , dan B adalah vektor

ϕ adalah sudut antara arah arus I dan medan magnet B .

Gambar 2.8. menunjukkan bahwa arah gaya yang dialami oleh dl elemen konduktor membawa arus ditempatkan di medan magnet eksternal B dan dapat ditentukan berdasarkan aturan tangan kiri. Menurut aturan tangan kiri, jika jari tengah mengikuti arah aliran arus dan jari telunjuk mengikuti arah fluks medan magnet luar maka akan menampilkan

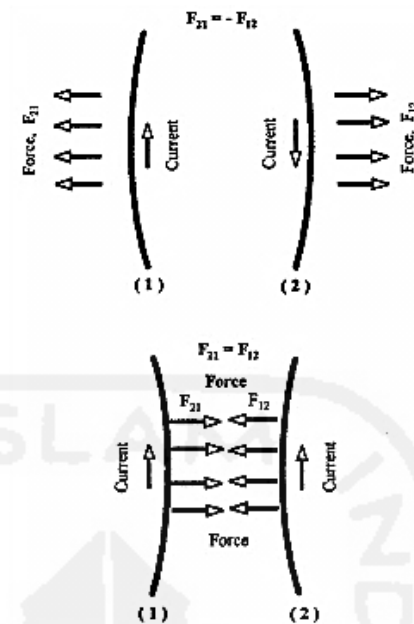


Gambar 2.8. Aturan tangan kiri kekuatan magnet

(Sumber: Valery,dkk, 2003).

Dari persamaan (2.8.), jika sudut ϕ searah arus I dan medan magnetik B sama dengan nol, maka $\sin \phi$ adalah 0 dan karenanya tidak akan ada gaya oleh konduktor membawa arus. Dengan kata lain, jika konduktor membawa arus sejajar medan magnet maka konduktor tidak akan merasakan kekuatan dari medan eksternal. Jika dua konduktor dialiri arus (misalnya, bus bar atau kabel) dengan arus berorientasi ke arah yang berlawanan dan terletak dekat satu sama lain maka setiap konduktor akan mengalami kekuatan yang berorientasi ke arah yang berlawanan (Gambar 2.9. atas.).

Jika dua konduktor yang membawa arus yang berorientasi pada arah yang sama, kekuatan akan lebih diutamakan dengan cara saling menarik antara kedua konduktor dan terjadi gaya $F_{12} = F_{21}$ (Gambar 2.9. bawah.).



Gambar 2.9. Kekuatan magnetik dalam konduktor dialiri arus
(Sumber: Valery, dkk, 2003).

Dari dasar-dasar electromagnetik diketahui bahwa masing-masing dari dua kawat sejajar yang dialiri arus menghasilkan medan magnetik menurut Persamaan. (2.8).

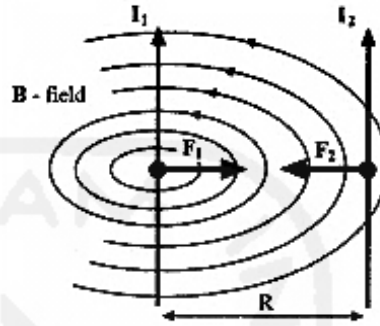
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \dots\dots\dots(2.8.)$$

(Sumber: Valery, dkk, 2003).

di mana, R adalah jarak radial antara kawat.

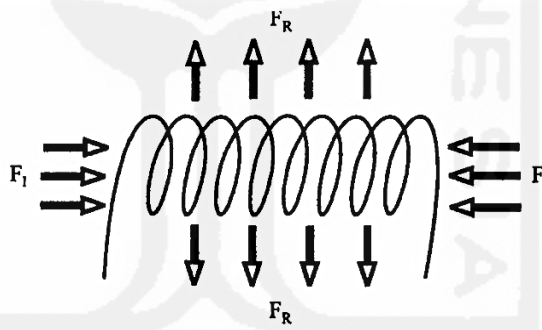
Tegangan bolak-balik diterapkan pada lilitan solenoid mengakibatkan arus mengalir di dalamnya dan distribusi kekuatan akan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.

Pada saat yang sama, dalam arah radial, ternyata ada kekuatan tarik solenoida, karena arus yang mengalir di seberang mengalir ke arah yang berlawanan.



Gambar 2.10. Interaksi magnetik antara dua kawat tipis

(Sumber: Valery, dkk, 2003).



Gambar 2.11. Kekuatan magnetik dalam kumparan solenoidal

(Sumber: Valery, dkk, 2003).

Kumparan mengalami tekanan magnetik tarik tetapi benda kerja berada di bawah tekanan tekan. Arus eddy yang mengalir dalam benda panas berorientasi ke arah yang berlawanan dibandingkan dengan arus kumparan (Callebaut, 2007).

2.3.2. Resistivitas Listrik pada Logam

Kemampuan material menghantarkan arus listrik ditentukan oleh konduktivitas listrik. Kebalikan dari konduktivitas adalah resistivitas listrik. Logam dan logam campuran dianggap sebagai konduktor yang baik dan memiliki resistivitas listrik yang lebih kecil dibandingkan bahan lainnya (misalnya, keramik, plastik, dll). Tabel 2.1 menunjukkan nilai-nilai resistivitas listrik untuk bahan logam umum.

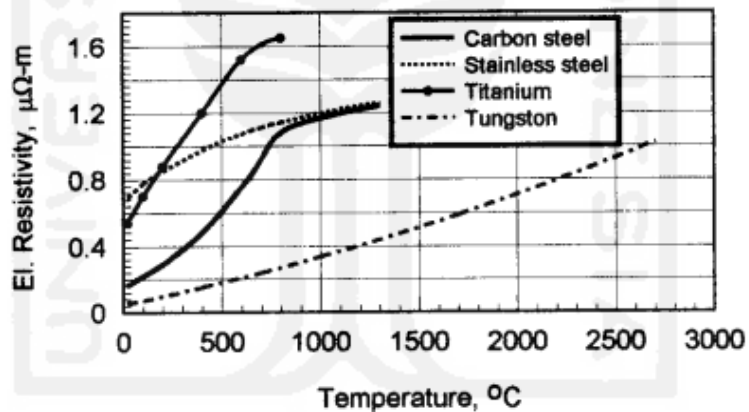
Tabel 2.1. Resistivitas listrik untuk beberapa bahan logam umum.

Material (at Room Temperature)	Electrical Resistivity ($\mu \Omega \cdot m$)	Material (at Room Temperature)	Electrical Resistivity ($\mu \Omega \cdot m$)
Silver	0.015	Stainless steel	0.7
Copper	0.017	Lead	0.21
Gold	0.024	Titanium	0.42
Aluminium	0.027	Nichrome	1
Tungsten	0.054	Graphite	14,000
Zinc	0.059	Wood	$10^{14} - 10^{17}$
Nickel	0.068	Glass	$10^{16} - 10^{20}$
Cobalt	0.09	Mica	$10^{17} - 10^{21}$
Mild carbon steel	0.16	Teflon	$>10^{19}$

(Sumber: Valery, dkk, 2003).

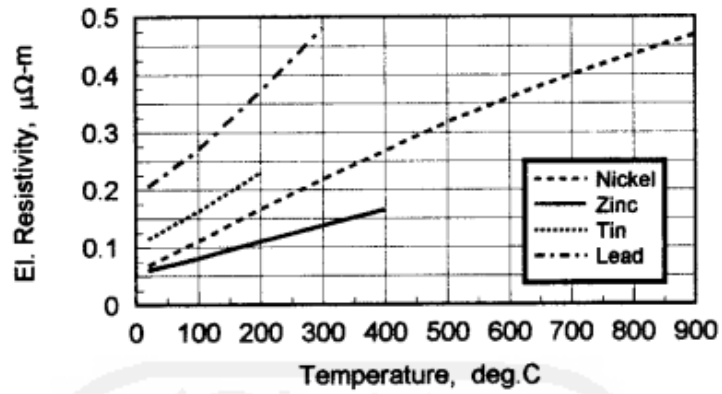
Resistivitas listrik suatu logam tertentu bervariasi dengan suhu, komposisi kimia, struktur mikro logam dan ukuran butir. Untuk sebagian besar logam, ρ akan naik dengan kenaikan suhu (Shaikhli, 2010).

Resistivitas listrik adalah sifat fisik yang sangat penting, karena mempengaruhi parameter penting dari sebuah sistem pemanas induksi. Gambar 2.12. dan gambar 2.13. menunjukkan resistivitas listrik dari bahan *stainless steel* dan *zinc* yang biasanya digunakan sebagai fungsi temperatur.

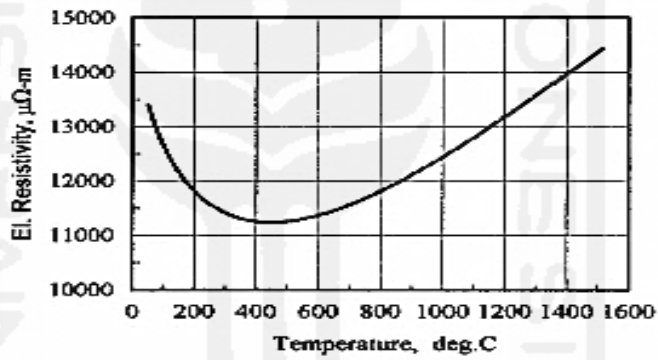


Gambar 2.12. Resistivitas listrik untuk *stainless steel*

(Sumber: Valery, dkk, 2003).



Gambar 2.13. Resistivitas listrik untuk *zinc*
(Sumber: Valery, dkk, 2003).



Gambar 2.14. Resistivitas listrik untuk *graphite*
dibandingkan dengan suhu
(Sumber: Valery, dkk, 2003).

Hubungan resistivitas listrik ρ (Ω -m) dengan resistivitas listrik R (Ω) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$R = \rho l / A \dots\dots\dots(2.9.)$$

di mana,

l adalah panjang konduktor yang dialiri arus.

A adalah luas penampang konduktor di mana arus mengalir melaluinya.

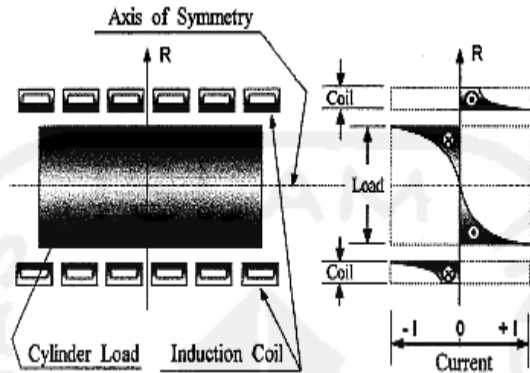
2.3.3. Efek Kulit

Ketika arus dc mengalir melalui konduktor, distribusi arus pada penampang konduktor itu adalah sama. Namun, ketika sebuah arus bolak-balik melalui konduktor yang sama, distribusi arus tidaklah sama. Nilai maksimum dari densitas arus akan selalu berada pada permukaan konduktor; kepadatan arus akan menurun dari permukaan konduktor menuju pusatnya (Sadhu, 2012).

Fenomena distribusi arus yang tidak sama dalam penampang konduktor disebut efek kulit, yang selalu terjadi ketika ada arus bolak-balik. Oleh karena itu, efek kulit juga akan ditemukan dalam benda kerja (logam) yang terletak di dalam sebuah kumparan induksi (Gambar 2.15.). Ini adalah salah satu faktor utama yang menyebabkan konsentrasi arus eddy pada lapisan permukaan (kulit) dari benda kerja. Karena sifat keliling dari pusaran arus induksi dalam benda kerja, maka tidak ada arus di tengah-tengah benda kerja.

Efek kulit adalah sesuatu hal yang penting dalam aplikasi listrik menggunakan tegangan bolak-balik (ac). Tingkat efek kulit tergantung pada frekuensi dan sifat material (resistivitas listrik ρ dan

permeabilitas magnetik relatif μ_r) pada konduktor. Akan muncul efek kulit ketika diberikan frekuensi yang semakin tinggi atau ketika jari-jari benda kerja relatif besar.



Gambar 2.15. Distribusi arus dalam kumparan sistem induksi

(Sumber: Valery, dkk, 2003).

Distribusi dari densitas arus sepanjang ketebalan benda kerja (radius) secara kasar dapat dihitung dengan persamaan (2.10).

$$I = I_0 e^{-y/\delta} \dots\dots\dots(2.10.)$$

dimana,

I adalah densitas arus pada jarak y dari permukaan (A/m^2).

I_0 adalah densitas arus pada permukaan benda kerja (A/m^2).

y adalah jarak dari permukaan menuju inti (m).

δ adalah kedalaman penetrasi (m).

Kedalaman penetrasi dalam meter adalah:

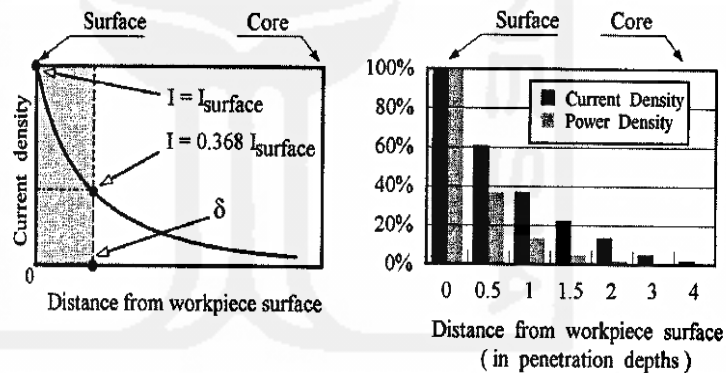
$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r F}} \dots\dots\dots(2.11.)$$

Dimana : ρ : resistivitas listrik dari logam ($\Omega.m$).

μ_r : permeabilitas magnetik relatif.

F : frekuensi, Hz (cycle/sec).

Gambar 2.16. menggambarkan efek penampilan kulit dengan menunjukkan distribusi densitas arus dan densitas daya dari permukaan benda kerja menuju inti.

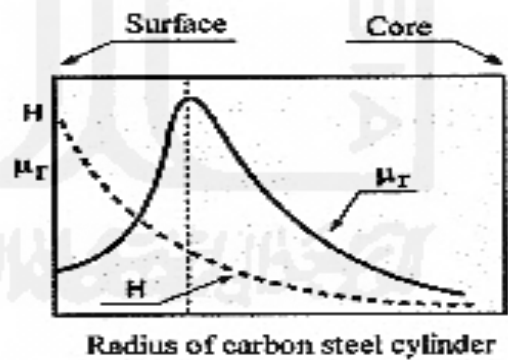


Gambar 2.16. Distribusi arus dan densitas daya karena efek kulit (Sumber: Valery, dkk, 2003).

Persamaan. (2.10.) menunjukkan bahwa kedalaman penetrasi memiliki nilai yang berbeda untuk material yang berbeda dan merupakan fungsi dari frekuensi. Permeabilitas magnetik δ dari bahan nonmagnetic adalah setara dengan udara

dan diberi nilai 1. Selama siklus pemanasan, ρ logam dapat meningkat menjadi empat sampai lima kali dari nilai awalnya. Oleh karena itu, bahkan untuk logam nonmagnetic, selama siklus pemanasan kedalaman penetrasi dapat meningkat secara signifikan.

Distribusi kepadatan arus (sumber panas) tidak sama dan selalu ada gradien termal dalam benda panas. Gradien termal ini menghasilkan distribusi yang sama untuk resistivitas listrik dan *magnetic permeability* dalam benda kerja. Permeabilitas magnetik relatif akan sama sepanjang ketebalan benda kerja karena distribusi yang sama dari intensitas medan magnet (Gambar 2.17.).



Gambar 2.17. Distribusi intensitas medan magnet (H) dan permeabilitas magnetik relatif (μ_r) sepanjang jari-jari silinder baja karbon homogen (Sumber: Valery, dkk, 2003).

2.4. Metode Taguchi

Metode Taguchi diperkenalkan pertama kali oleh Dr Genichi Taguchi pada saat pertemuan yang diselenggarakan oleh AT & T, sebuah perusahaan telekomunikasi terkemuka di Amerika Serikat. Dr Genichi Taguchi merupakan seorang konsultan pengendalian kualitas dari Jepang. Teknik optimasi dengan menggunakan metode Taguchi menggunakan matriks yang disebut matriks *Orthogonal Array* untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberi informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter. Bagian terpenting dari *Orthogonal Array* terletak pada pemilihan kombinasi level dari variabel-variabel input untuk masing-masing eksperimen.

Menurut Dr. Genichi Taguchi, ada 2 (dua) segi umum kualitas yaitu kualitas rancangan dan kualitas kecocokan. Kualitas rancangan adalah variasi tingkat kualitas yang ada pada suatu produk yang memang disengaja, sedangkan kualitas kecocokan adalah seberapa baik produk itu sesuai dengan spesifikasi dan kelonggaran yang disyaratkan oleh rancangan. Metode Taguchi menggunakan seperangkat matriks khusus yang disebut *Orthogonal Array*. Taguchi menyusun *Orthogonal Array* untuk tata letak eksperimennya.

Menurut Wuryandari.dkk.(2009), tabel *Orthogonal Array* dapat digunakan untuk menentukan kontribusi setiap faktor yang berpengaruh terhadap kualitas dan dapat diketahui tingkat faktor yang memberikan hasil yang optimal. Dengan *Orthogonal Array* untuk tata letak eksperimennya,

maka tidak semua perlakuan dijalankan atau dengan kata lain, *run* nya dapat dipersingkat sehingga waktu dan biaya dapat dipersingkat.

Dalam metode Taguchi digunakan matriks yang disebut *Orthogonal Array* untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberi informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter. Bagian terpenting dari *Orthogonal Array* terletak pada pemilihan kombinasi level dari variabel-variabel input untuk masing-masing eksperimen. Filosofi Taguchi terhadap kualitas terdiri dari tiga buah konsep, yaitu :

1. Kualitas harus didesain ke dalam produk dan bukan sekedar memeriksanya. Kualitas terbaik dicapai dengan meminimumkan deviasi dari target.
2. Produk harus didisain sehingga *robust* terhadap faktor lingkungan yang tidak dapat dikontrol.
3. Biaya kualitas harus diukur sebagai fungsi deviasi dari standar tertentu dan kerugian harus diukur pada seluruh sistem.

2.4.1. Prinsip Kerja Metode Taguchi

1. Pemilihan dan penyesuaian *Orthogonal Array* (OA)

Orthogonal Array adalah suatu matriks yang elemen-elemennya disusun menurut baris dan kolom. Kolom merupakan faktor atau kondisi yang dapat diubah dalam eksperimen.

Baris merupakan keadaan dari faktor *Array* disebut *Orthogonal* karena level-level dari faktor berimbang dan dapat dipisahkan dari

pengaruh faktor yang lain dalam eksperimen. Jadi *Orthogonal Array* adalah matriks seimbang dari faktor dan level, sedemikian hingga pengaruh suatu faktor atau level tidak baur (*counfounded*) dengan pengaruh faktor atau level yang lain. OA membutuhkan eksperimen yang lebih sedikit dalam mengevaluasi beberapa faktor sehingga memberikan eksperimen yang lebih efisien dengan tetap tidak kehilangan informasi dari eksperimen yang diamati. Setelah menentukan jumlah faktor, jumlah taraf masing-masing faktor dan interaksi antar faktor, maka dalam penyusunan *Orthogonal Array* diperlukan perhitungan jumlah total derajat bebas. Jumlah total derajat bebas adalah merupakan minimal baris dalam OA, atau paling sedikit sama dengan banyaknya eksperimen yang harus dilakukan. Sehingga pemilihan OA yang sesuai dengan barisnya tidak boleh kurang dari jumlah total derajat bebas. OA yang sesuai dapat dilihat dari salah satu OA standar yang diberikan oleh Taguchi. Cara pemilihan matriks orthogonal adalah:

Jumlah Derajat bebas (db) minimum yang diperlukan oleh *inner array* :

$$\text{Jumlah db}_{f_f} (A, B, C, D, E, F, G) = (nA-1) + (nB-1) + (nC-1) + (nD-1) + (nE-1) + (nF-1) + (nG-1).$$

Dimana n = jumlah level = 2 untuk masing-masing faktor (7), sehingga jumlah $db_{f_f} = 7 \times (2-1) = 7$, maka *orthogonal array* yang

terpilih adalah L8 karena $db_{OA} \geq db_{ff}$, dengan $db_{OA} = 8 - 1 = 7$, sedang $db_{ff} = 7$, maka berlaku hubungan $db_{OA} \geq db_{ff} = 7 = 7$. Dalam OA untuk dua level terdiri dari L4, L8, L12, L16, L32 dan untuk tiga level terdiri dari L9, L18, L27.



Gambar 2.18. Notasi *Orthogonal Array*

Keterangan :

1) Notasi L

Notasi L menyatakan informasi mengenai *Orthogonal Array*

2) Nomor Baris

Menyatakan jumlah percobaan yang dibutuhkan ketika menggunakan *Orthogonal Array*.

3) Nomor Level

Menyatakan jumlah level faktor.

4) Nomor Kolom

Menyatakan jumlah faktor yang diamati dalam *Orthogonal Array*

2. Derajat Bebas (*Degree of Freedom*)

Derajat bebas merupakan banyaknya perbandingan yang harus dilakukan antar level–level faktor (efek utama) atau interaksi yang

digunakan untuk menentukan jumlah percobaan minimum yang dilakukan. Perhitungan derajat bebas dilakukan agar diperoleh suatu pemahaman mengenai hubungan antara suatu faktor dengan level yang berbeda-beda terhadap karakteristik kualitas yang dihasilkan. Perbandingan ini sendiri akan memberikan informasi tentang faktor dan level yang mempunyai pengaruh signifikan terhadap karakteristik kualitas. Untuk menentukan *Orthogonal Array* yang diperlukan maka dibutuhkan perhitungan derajat kebebasan adalah sebagai berikut :

Untuk faktor utama, misal faktor utama A dan B

$$\begin{aligned} V_A &= (\text{jumlah level faktor A}) - 1 \\ &= k_A - 1 \dots\dots\dots(2.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_B &= (\text{jumlah level faktor B}) - 1 \\ &= k_B - 1 \dots\dots\dots(2.13) \end{aligned}$$

Untuk interaksi, misal interaksi A dan B

$$V_{A \times B} = (k_A - 1)(k_B - 1) \dots\dots\dots (2.14)$$

Nilai derajat bebas total

$$(k_A - 1) + (k_B - 1) + (k_A - 1)(k_B - 1) \dots\dots\dots(2.15)$$

Tabel *Orthogonal Array* yang dipilih harus mempunyai jumlah baris minimum yang tidak boleh kurang dari jumlah derajat bebas totalnya.

2.4.2. Disain Eksperimen Taguchi

Metode Taguchi merupakan suatu metode dalam bidang *engineering* yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk atau

proses dalam waktu yang bersamaan untuk menekan sumber daya dan *loss function*. Sehingga diharapkan dapat mencapai target dan produk atau proses tidak sensitif terhadap faktor *noise*. Suatu teknik untuk mendefinisikan dan menyelidiki semua kondisi yang mungkin dalam suatu eksperimen yang melibatkan *multiple* faktor disebut disain eksperimen. Dalam hal ini disain eksperimen cukup efektif bila faktor dan level di tiap faktor yang terlihat dalam tiap percobaan relatif kecil jumlahnya, misal terdapat 2 faktor dengan masing-masing 2 level, maka akan dihasilkan kombinasi sebanyak 2^2 (4) kombinasi yang mungkin. Tetapi bila jumlah faktor sangat banyak, misalnya 15 faktor dengan masing-masing 2 level, akan tetapi terdapat 2^{15} (32.768) kombinasi yang mungkin. Hal ini tentu sangat tidak efisien dalam hal waktu, biaya maupun tenaga.

Untuk mengatasi hal ini, Genechi Taguchi mengusulkan suatu teknik untuk menyederhanakan eksperimen tanpa mengurangi esensi dari percobaan. Taguchi melakukan pendekatan dengan *Fraksional Factorial Eksperimen* (FFE) yang standar dan konsisten sehingga meningkatkan efisiensi dari percobaan yang akan dilakukan. Taguchi membangun beberapa FFE yang dapat digunakan pada berbagai situasi. Pada FFE ini dipilih beberapa kondisi perlakuan untuk tetap mempertahankan prinsip orthogonalitas diantara berbagai faktor dan kombinasi.

Tabel 2.2 Strategi Taguchi untuk minimasi jumlah eksperimen.

(Eksperimen dengan 7 faktor, 2 level)

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																
E2	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																

Orthogonal Array adalah matriks faktor dan level yang disusun sedemikian rupa sehingga pengaruh suatu faktor dan level tidak berbau dengan faktor dan level lainnya. Elemen-elemen matriks disusun menurut baris dan kolom. Baris merupakan keadaan suatu faktor, sedangkan kolom adalah faktor yang dapat diubah dalam eksperimen. Keuntungan *Orthogonal Array* adalah kemampuan untuk mengevaluasi beberapa faktor dengan jumlah tes atau pengujian yang minimum. Jika pada percobaan terhadap 7 faktor dengan 2 level, menggunakan *full factorial experiment* akan diperlukan 27 buah percobaan.

Tabel 2.3 *Full-factorial experiments*(diperlukan 2^7 kombinasi level faktor)

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																
E2	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																

Orthogonal Array merupakan salah satu bagian kelompok *Fractional Factorial Experiment* (FFE). Sedangkan FFE merupakan percobaan yang hanya menggunakan sebuah bagian dari kondisi total (*Full Factorial Experiment*), bagian ini barang kali hanya separuh, seperempat, atau seperdelapan dari percobaan faktorial penuh. Matriks eksperimen merupakan sebuah matriks yang berisi satu set eksperimen diatur perubahan kombinasi dari parameter proses atau produk. Kombinasi parameter tersebut dilakukan selama eksperimen dan hasil data yang diperoleh dianalisa untuk menentukan efek dari parameter tertentu.

Tabel 2.4 1/2 FFE (*Fractional-Factorial Experiment*)

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1	■			■		■	■			■	■		■			■
		G2		■	■		■			■	■			■		■	■	
	F2	G1		■	■			■		■	■			■		■	■	
		G2	■			■		■	■			■	■			■		■
E2	F1	G1		■	■		■			■	■			■	■			■
		G2	■			■		■	■			■	■			■		■
	F2	G1	■			■		■	■			■	■			■		■
		G2		■	■			■		■	■			■		■	■	

Orthogonal Array (OA) ini merupakan desain dari Taguchi yang dibangun untuk mengurangi jumlah percobaan yang harus seharusnya dilakukan dengan metode dari eksperimen konvensional. Dengan *orthogonal array* akan dapat dikurangi jumlah percobaan yang dilakukan sehingga akan mengurangi waktu dan ongkos percobaan. Dalam 1/2 FFE (*Fractional-Factorial Experiment*), jumlah eksperimen yang dilakukan sebanyak 64 sampel dari 128 sampel yang seharusnya dilakukan dengan variasi sesuai pada tabel 2.4.

Tabel 2.5. 1/4 FFE (*Fractional – Factorial Experiment*)

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1	■			■		■	■			■	■		■			■
		G2																
	F2	G1					■	■										
		G2	■			■						■	■		■			■
E2	F1	G1																
		G2		■	■					■	■		■		■	■		
	F2	G1		■	■					■	■		■		■	■		
		G2																

Dalam memilih *OA* yang sesuai diperlukan suatu persamaan yang dapat mempresentasikan jumlah faktor, jumlah level dan jumlah eksperimen yang akan dilakukan. Jumlah derajat kebebasan pada *OA* standar harus lebih besar atau sama dengan perhitungan derajat kebebasan pada eksperimen yang akan dilakukan. Pada matriks 1/4 FFE (*Fractional-Factorial Experiment*), *Orthogonal Array* yang digunakan adalah L32 (2^{31}), artinya jumlah kolom 31 masing-masing 2 level faktor. Sehingga jumlah eksperimen yang dilakukan sebanyak 32 sampel dari 128 sampel yang seharusnya dilakukan dengan variasi sesuai pada tabel 2.5.

Tabel 2.6 1/8 FFE (*Fractional-Factorial Experiment*)

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1	■												■			
		G2				■												■
	F2	G1							■					■				
		G2						■					■					
E2	F1	G1						■					■					
		G2							■				■					
	F2	G1				■												■
		G2	■												■			

Dalam teknik *robust design*, penyusunan matriks eksperimen ini dapat menggunakan spesial standart matrik. Pada matrik 1/8 FFE (*Fractional-Factorial Experiment*), jumlah eksperimen yang dilakukan sebanyak 16 sampel dari 128 sampel yang seharusnya dilakukan dengan variasi sesuai pada tabel 2.6.

Tabel 2.7 1/16 FFE (*Fractional–Factorial Experiment*)

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																
E2	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																

Dalam disain eksperimen Taguchi sebisa mungkin digunakan *Orthogonal Array* terkecil yang masih dapat memberikan informasi yang cukup untuk dilakukan percobaan secara komprehensif dan penarikan kesimpulan yang valid. Untuk menentukan *Orthogonal Array* yang diperlukan adalah perhitungan total derajat bebas (*Total Degree of Freedom*). Dalam 1/16 FFE (*Fractional–Factorial Experiment*), atau OA L8 (2^7) terdiri dari 7 kolom atau faktor masing-masing 2 level faktor. Jumlah eksperimen yang dilakukan sebanyak 8 sampel dari 128 sampel yang seharusnya dilakukan dengan variasi sesuai pada tabel 2.7.

Tabel 2.8 Taguchi : L8 (2⁷) OA Matrik

Trial	Column						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Sumber : Soejanto ,2009

2.4.3. Disain Sistem Kualitas

Disain Sistem Kualitas terdiri dari dua macam yaitu:

1. Disain Kokoh (*Robust Design*)

Salah satu tujuan dari eksperimen pada parameter disain adalah untuk menyusun satu kombinasi faktor-faktor yang kokoh (*robust*) terhadap adanya faktor-faktor pengganggu (*noise*), dimana faktor-faktor *noise* ini tidak dapat atau sulit dikendalikan, dan menyebabkan timbulnya variabilitas yang tinggi pada produk. Dengan adanya kombinasi yang optimal dari faktor-faktor kontrol, maka proses atau produk akan tahan terhadap adanya gangguan tersebut.

2. Disain Parameter Taguchi

Dalam upaya meningkatkan kualitas produk dan memperkecil variabilitas yang terjadi, Taguchi memperkenalkan upaya-upaya yang dapat ditempuh guna menghasilkan produk dengan tingkat variabilitas yang kecil, dengan mengatur parameter-parameter yang mempengaruhinya pada tingkat yang paling kurang sensitif terhadap faktor gangguan (*noise*).

Cara ini dikenal dengan disain parameter Taguchi, yang ditujukan terutama untuk meningkatkan kualitas tanpa menghilangkan penyebab timbulnya variabilitas. Untuk meningkatkan kualitas produk Taguchi membagi atas 3 hal :

1) Disain Sistem (*System Design*)

Disain sistem adalah upaya dimana konsep-konsep, ide-ide, metode-metode baru dan sebagainya dimunculkan untuk memberikan peningkatan produk kepada pemakai. Sebagai salah satu cara untuk memenangkan persaingan yaitu dengan terus mengembangkan teknologi baru, sehingga dalam hal ini konsep-konsep, metode maupun penemuan baru sangat bermanfaat dalam disain sistem.

2) Disain Parameter (*Parameter Design*)

Disain parameter adalah hal yang sangat penting dalam upaya meningkatkan keseragaman produk atau mencegah tingginya

variabilitas. Pada tahap ini parameter-parameter dari produk atau proses tertentu ditetapkan untuk menghasilkan performansi produk menjadi kurang atau tidak sensitif terhadap penyebab terjadinya variabilitas. Disain eksperimen dilakukan untuk mendapatkan kondisi faktor-faktor yang tahan terhadap penyebab timbulnya variabilitas.

3) Disain Toleransi (*Tolerance Design*)

Pada disain toleransi ini, kualitas ditingkatkan dengan mengetatkan toleransi pada parameter produk atau proses untuk mengurangi terjadinya variabilitas pada performansi produk. Eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini menerapkan langkah-langkah prinsip disain parameter, yaitu melakukan eksperimen guna menentukan faktor dominan yang berpengaruh terhadap peningkatan kualitas faktor dan menentukan kombinasi faktor-faktor dimana kombinasi tersebut tahan terhadap penyebab timbulnya variabilitas.

3. Langkah-langkah dalam melakukan eksperimen

Taguchi mengusulkan langkah-langkah yang sistematis dalam melakukan eksperimen yaitu sebagai berikut :

(1) Menyatakan permasalahan yang akan dipecahkan

Yaitu mendefinisikan dengan se jelas mungkin permasalahan yang dihadapi untuk dilakukan suatu upaya perbaikan.

(2) Penentuan tujuan penelitian

Meliputi pengidentifikasian karakteristik kualitas dan tingkat performansi dari eksperimen.

(3) Menentukan metode pengukuran

Menentukan bagaimanakah parameter-parameter yang diamati akan diukur, dan bagaimana cara pengukurannya dan peralatan yang diperlukan.

(4) Identifikasi faktor

Tahap ini adalah melakukan pendekatan yang sistematis guna menemukan penyebab permasalahan. Untuk mendapatkan gambaran mengenai faktor yang akan diteliti, maka langkah-langkah yang dapat ditempuh adalah sebagai berikut :

4. Memisahkan faktor kontrol dan *noise* faktor

Untuk memulai langkah dalam disain parameter Taguchi, hal yang harus diketahui adalah jenis-jenis faktor yang mempengaruhi karakteristik proses atau produk. Taguchi membedakan faktor ke dalam dua golongan besar yaitu :

a) Faktor kontrol

Yaitu faktor yang sudah ditetapkan nilainya oleh perancangannya, dan nilainya dapat dikontrol. Sebuah faktor kontrol biasanya mempunyai satu atau lebih yang disebut dengan level. Pada akhir eksperimen level yang sesuai dari

faktor kontrol dapat dipilih. Satu aspek dari desain yang *robust* adalah memilih setting level kontrol faktor yang optimal, yang membuat karakteristik kualitas tidak sensitif terhadap *noise*.

b) Faktor *noise*

Adalah faktor yang dapat menyebabkan penyimpangan dari karakteristik kualitas dari nilai target. Faktor ini tidak dapat untuk dikontrol, dapat memakan biaya yang sangat besar sehingga tidak ekonomis untuk dikontrol.

5. Menentukan level dari faktor dan nilai faktor
Penentuan level ini menentukan jumlah derajat bebas yang akan digunakan dalam pemilihan *Orthogonal Array*.
6. Mengidentifikasi faktor yang mungkin berinteraksi
Apabila pengaruh dari suatu faktor tergantung dari level faktor lain, dikatakan terjadi suatu interaksi.
7. Menggambar *linear graph* yang diperlukan untuk faktor kontrol dan interaksi.

Penggambaran *linear graph* ini untuk menentukan penempatan faktor-faktor serta interaksi yang mungkin digunakan pada kolom-kolom dalam *Orthogonal Array*. Taguchi telah menetapkan beberapa *linear graph* untuk mempermudah mengatur faktor-faktor dari interaksi ke dalam kolom.

8. Memilih *Orthogonal array*

Orthogonal Array adalah matrik dari sejumlah kolom dan baris. Masing-masing kolom mewakili faktor-faktor dari percobaan yang dilakukan. *Orthogonal Array* ini memenuhi asumsi orthogonalitas, yaitu bahwa level dari masing-masing faktor adalah seimbang dan dapat dipisahkan dari pengaruh faktor yang lain dalam eksperimen.

9. Memasukkan faktor atau interaksi ke dalam kolom

Taguchi menyediakan dua alat untuk membantu memasukkan faktor dan interaksi ke dalam kolom *array* yaitu *linear graph* dan *triangular tables*.

10. Melakukan percobaan

Dalam eksperimen ini sejumlah percobaan (*trial*) disusun untuk meminimasi kesempatan terjadinya kesalahan dalam menyusun level yang tepat untuk percobaan. Prinsip randomisasi juga harus diperhatikan dalam masalah ini.

11. Analisis hasil eksperimen

Dalam menganalisa hasil eksperimen dari Taguchi ini juga menggunakan metode ANOVA, yaitu perhitungan jumlah kuadrat total, jumlah kuadrat terhadap rata-rata, jumlah kuadrat faktor, dan jumlah kuadrat *error*.

a) *Pooling Factor*

Suatu metode yang dianjurkan apabila faktor yang diamati ternyata tidak signifikan secara statistik setelah melalui uji signifikansi.

b) Persen kontribusi

Bagian dari total variasi yang diamati pada eksperimen dari masing-masing faktor yang signifikan pada metode Taguchi dinyatakan dalam persen kontribusi. Persen kontribusi menandakan kekuatan relatif dari suatu faktor atau interaksi untuk mereduksi variasi. Jika level faktor dan interaksi dikendalikan dengan cermat, maka total variasi akan berkurang sejumlah yang diindikasikan pada persen kontribusi.

c) *Rasio Signal to Noise* (Rasio S/N)

Taguchi memperkenalkan pendekatan Rasio S/N untuk meneliti pengaruh faktor *noise* terhadap variasi yang timbul.

Terdapat beberapa jenis Rasio S/N tergantung pada karakteristik kualitas yang diinginkan, yaitu :

- (1) *Larger the Better* (LTB) yaitu karakteristik kualitas dalam pengukurannya bahwa semakin tinggi nilainya, maka kualitasnya akan lebih baik

(2) *Nominal the Best* (NTB), biasanya ditetapkan suatu nilai nominal tertentu, dan semakin mendekati nilai nominal tersebut, kualitas semakin baik.

(3) *Smaller the Better* (STB), meliputi pengukuran dimana akan semakin kecil nilainya, maka kualitasnya akan lebih baik.

12. Pemilihan level faktor untuk kondisi optimal.

Apabila percobaan terdiri dari banyak faktor, dan tiap-tiap faktor terdiri dari beberapa level, maka untuk menentukan kombinasi level yang optimal adalah membandingkan nilai perbedaan rata-rata eksperimen dari level yang ada.

13. Perkiraan rata-rata proses pada kondisi optimal

Setelah mendapatkan kondisi yang optimal dari eksperimen dengan *Orthogonal Array*, maka dapat diperkirakan rata-rata proses untuk prediksi pada kondisi yang optimal. Hal ini di dapat dengan menjumlahkan pengaruh dari ranking faktor yang lebih tinggi. Pengaruh dari faktor yang signifikan adalah pengaruhnya pada rata-rata percobaan.

2.4.4. *Rasio Signal to Noise* (Rasio S/N)

Rasio S/N adalah logaritma dari suatu fungsi kerugian kuadratik dan digunakan untuk mengevaluasi kualitas suatu produk. Menurut Soejanto (2009) Ada beberapa jenis Rasio S/N, yaitu:

1. *Smaller-the-Better* (STB)

Karakteristik kualitas dimana semakin rendah nilainya, maka kualitas semakin baik. Contohnya adalah efisiensi energi, dimana semakin kecil energi yang digunakan semakin baik karena semakin sedikit biaya yang dikeluarkan.

Nilai Rasio S/N untuk jenis karakteristik STB Taguchi memperkenalkan pendekatan

$$SNR_{STB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana :

n = jumlah tes di dalam percobaan (*trial*).

y_i = nilai respon dari tiap replikasi.

2. *Larger-the-Better* (LTB)

Karakteristik kualitas dimana semakin besar nilainya, maka kualitas semakin baik. Contohnya adalah thermocouple, semakin besar nilai panas yang didapatkan akan semakin baik karena tegangan yang digunakan akan sedikit. Nilai Rasio S/N untuk jenis LTB adalah

$$SNR_{LTB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \dots\dots\dots (2.17)$$

3. *Nominal-the-Best* (NTB)

Karakteristik kualitas dimana ditetapkan suatu nilai nominal tertentu, jika nilainya semakin mendekati nilai nominal tertentu

tersebut maka kualitasnya semakin baik, contohnya nilai $\cos \phi$ dimana semakin mendekati ukuran nominal yang ditetapkan kualitasnya semakin baik.

$$SNR_{NTB} = 10 \log \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1} \dots\dots\dots(2.19)$$

2.4.5. Uji Distribusi Normal

Asumsi bahwa populasi berdistribusi normal, telah melancarkan teori dan metode statistik sedemikian rupa sehingga banyak persoalan yang dapat diselesaikan dengan lebih mudah dan cepat. Oleh karena itu cukup mudah dimengerti kiranya bahwa asumsi normalitas perlu dicek keberlakuannya agar langkah-langkah selanjutnya dapat dipertanggungjawabkan (Gaspersz,2001)

Untuk keperluan pengujian normalitas ini, data harus disusun dalam daftar distribusi frekuensi yang terdiri atas k buah interval. Uji kebaikan-suai antara frekuensi yang teramati dengan frekuensi harapan didasarkan pada besaran

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \dots\dots\dots(2.20)$$

Nilai χ^2 merupakan sebuah nilai peubah acak χ^2 yang sebaran penarikan, contohnya sangat menghampiri nilai Chi-kuadrat. Lambang O_i dan E_i masing-masing menyatakan frekuensi observasi kategori i dan frekuensi harapan Kategori i .(Usman ,2006).

Bila frekuensi teramati sangat dekat dengan frekuensi harapannya, nilai χ^2 akan kecil, menunjukkan adanya kesesuaian yang baik. Bila frekuensi teramati berbeda cukup besar dari frekuensi harapannya, nilai χ^2 akan besar sehingga kesesuaiannya buruk. Kesesuaian yang baik akan membawa penerimaan H_0 , sedangkan kesesuaian yang buruk akan membawa pada penolakan H_0 . Dengan demikian wilayah kritisnya akan jatuh di ekor kanan sebaran Chi-kuadratnya. Untuk taraf nyata sebesar α , nilai kritisnya $\chi^2(\alpha)(db)$ dapat diperoleh pada tabel distribusi Chi-kuadrat, dengan demikian wilayah kritisnya adalah $\chi^2 \geq \chi^2(\alpha)(db)$ (Sudjana,2002).

Jika $db=1$ Kriteria keputusan ini tidak dapat digunakan apabila ada frekuensi harapan yang nilainya kurang dari 5. Maka frekuensi yang diharapkan harus ≥ 5 . jika tidak maka harus digunakan uji binomial. Jika $db > 1$, uji ini tidak boleh dipakai jika lebih dari 20% dari frekuensi yang diharapkan < 5 atau sembarang frekuensi yang diharapkan < 1 . Pemecahannya dengan menggabungkan kategori-kategori yang berdekatan.(Usman,2006).

2.4.6. Uji Homogenitas Variansi (Uji Bartlett)

Untuk menguji kesamaan beberapa buah rata-rata, sebagaimana dalam metode analisis variansi (ANOVA), diasumsikan populasinya mempunyai variansi yang homogen, yaitu $\alpha_1^2 = \alpha_2^2 = \dots = \alpha_k^2$ sehingga perlu dilakukan pengujian homogenitas (kesamaan) variansi populasi normal.

Dari k ($k > 2$) buah populasi berdistribusi independen dan normal masing-masing dengan variansi $\alpha_1^2, \alpha_2^2, \dots, \alpha_k^2$. Akan diuji hipotesis :

$$H_0: \alpha_1^2 = \alpha_2^2 = \dots = \alpha_k^2$$

H_1 : paling sedikit satu tanda sama dengan tidak berlaku

Salah satu cara untuk menguji homogenitas k buah ($k \geq 2$) variansi populasi yang berdistribusi normal adalah dengan uji Bartlett. Misal populasi memiliki masing-masing sampel berukuran n_1, n_2, \dots, n_k dengan data Y_{ij}

($i=1, 2, \dots, n_k$) kemudian dari sampel-sampel itu dihitung masing-masing variansinya yaitu $s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2$.

Nilai statistik hitung uji Bartlett digunakan dengan rumusan Chi-Square

$$x^2 = (\ln 10) \{ B - \sum (n_i - 1) \log s_i^2 \} \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana:

$$\ln 10 = 2,306$$

$$B = (\log s^2) \sum (n_i - 1) \dots\dots\dots(2.22)$$

$$s^2 = \frac{\sum (n_i - 1) s_i^2}{\sum (n_i - 1)} \dots\dots\dots(2.23)$$

Dengan taraf nyata α , hipotesis H_0 ditolak jika $x^2_{hitung} \geq x^2_{(1-\alpha)(db)}$, dimana $x^2_{(1-\alpha)(db)}$ didapat dari tabel Chi-Kuadrat dengan peluang $(1-\alpha)$ dan $db = (k-1)$.

2.4.7. Analisis Variansi (ANOVA)

Langkah-langkah perhitungan dalam analisis variansi multifaktor adalah sebagai berikut (Soejanto,2009) :

- 1) Menghitung normalitas data dan homogenitas data.
- 2) Hipotesis (H_0 dan H_1) dalam bentuk kalimat.
- 3) Hipotesis (H_0 dan H_1) dalam bentuk statistik
- 4) Membuat daftar statistik induk
- 5) Menghitung harga-harga *Sum of Square* (SS) atau jumlah kuadrat

(JK)

- a. Menghitung respon rata-rata masing-masing eksperimen :

$$\bar{y}_1 = \frac{y_1 + \dots + y_3}{n} \dots\dots\dots(2.24)$$

- b. Menghitung rata-rata keseluruhan eksperimen

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n} \dots\dots\dots(2.25)$$

- c. Menghitung *Total Sum of Square* (ST) atau jumlah kuadrat total, dengan

$$ST = \sum_{i=1}^n y^2 \dots\dots\dots(2.26)$$

Keterangan:

y^2 = Kuadrat nilai respon (data pengamatan) ke.

n = jumlah pengamatan

- d. *The Sum of Squares Due to the Mean* (Sm) atau jumlah kuadrat rata-rata

$$Sm = n \times \bar{y}^2 \dots\dots\dots(2.27)$$

Keterangan :

Sm = Jumlah kuadrat rata-rata

n = jumlah pengamatan

\bar{y}^2 = Kuadrat rata-rata pengamatan

- e. *The Sum of squares of due to factors* (SA) atau jumlah kuadrat untuk suatu faktor, misal faktor A.

$$SA = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A^2}{n_{Ai}} \right) - \frac{T^2}{N} \right] \dots\dots\dots (2.28)$$

Keterangan:

SA = *Sum of Square* faktor A

A_i = jumlah nilai pengamatan dibawah level ke-i faktor A

n_{Ai} = banyaknya data pengamatan dibawah level ke-i faktor A

A_i^2 = rata-rata nilai pengamatan dibawah level ke-i faktor A

K_A = banyaknya level faktor A

Secara umum *Sum of Square* (SS) suatu faktor dapat dihitung dengan rumus :

$$SS = \sum(a(m_i - m)^2) \dots\dots\dots(2.29)$$

Keterangan:

SS = *Sum of Square* untuk setiap faktor

A = Jumlah munculnya tiap level faktor dalam suatu kolom matrik orhogonal

m_i = Rata-rata efek tiap level faktor

$i = 1, 2, \dots, k$

6) Menghitung *degree of freedom* (V_f) atau derajat bebas (db)

a. *Degree of freedom* total (V_{fT}) dirumuskan dengan :

$$v_{fT} = N - 1 \dots\dots\dots(2.30)$$

b. *Degree of freedom* suatu faktor, dirumuskan dengan :

$$v_{fA} = kA - 1 \dots\dots\dots(2.31)$$

c. *Degree of freedom error* (V_{fe}) dirumuskan dengan :

$$V_{fe} = v_{fT} - v_{faktor} \dots\dots\dots(2.32)$$

7) *The sum of squares due to error* (Se) atau jumlah kuadrat karena error

$$Se = ST - Sm - SA - SB - SC - SD - SE - SF - SG \dots\dots(2.33)$$

8) Menghitung *Mean of square* (Mq) suatu faktor atau interaksi faktor, dengan rumus :

$$Mq_A = \frac{SA}{df_A} \dots\dots\dots(2.34)$$

9) Menghitung F-ratio suatu faktor dengan rumus :

$$F_{ratio} = \frac{Mq}{Mqe} \dots\dots\dots(2.35).$$

10) Menghitung *pure of square* (SS') suatu faktor dengan rumus :

$$SS' = SS - (df \times Mqe) \dots\dots\dots(2.36)$$

11) Menghitung persen kontribusi (P) suatu faktor, dengan rumus :

$$P = \left[\frac{SS'}{SS_T} \right] \times 100\% \dots\dots\dots(2.37)$$

2.4.8. Uji F Pada Analisis Variansi

Untuk mengetahui ada tidaknya efek yang signifikan dari masing-masing faktor dan interaksinya secara serentak pada respon yang diamati, maka perlu dilakukan Uji F pada variansi dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Membuat hipotesis.
- 2) Menentukan besar tingkat signifikan (*level of significance*), α .
- 3) Kriteria pengujian:

Ho diterima apabila, $F_{hitung} \leq F(\alpha, v1;v2)$

Ho ditolak apabila, $F_{tabel} \geq F(\alpha, v1;v2)$

Dimana $F(\alpha, v_1;v_2)$ dapat diperoleh dari tabel distribusi F dengan peluang α dan derajat bebas $v_1 = k-1$ sebagai pembilang dan $v_2 = k(n-1)$ sebagai penyebut.

4) Perhitungan F_{hitung}

$$F = \frac{\text{Variance between mean}}{\text{Variance within group}} \dots\dots\dots(2.38)$$

Untuk membantu perhitungan F disusunlah tabel Anova. Format umum untuk analisis variansi satu arah ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2.9 Tabel Anova

Sumber Variansi	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F hitung
Antar Perlakuan	<i>SST</i>	k-1	$\frac{SST}{k-1} = S1^2$	$\frac{S1^2}{S2^2}$
Galat (dalam perlakuan)	<i>SSE</i>	k (n-1)	$\frac{SSE}{k(n-1)} = S2^2$	
Total	<i>SS Total</i>	nk-1		

(Sugiyono ,2010)

Kemudian menarik kesimpulan, apakah H_0 diterima atau ditolak dengan membandingkan F_{hitung} dengan F_{tabel} .

2.4.9. **Eksperimen Konfirmasi**

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk mengevaluasi apakah rancangan usulan sudah dieksperimenkan atau belum. Jika eksperimen usulan sudah dieksperimenkan maka tidak perlu eksperimen konfirmasi,tetapi jika eksperimen usulan belum dieksperimenkan maka harus dieksperimenkan dahulu sehingga akan diketahui hasilnya

apakah benar-benar sesuai atau tidak dengan eksperimenkan usulan. Jika hasil rancangan usulan berhasil meningkatkan kualitas dari kondisi awal, maka usulan tersebut dapat digunakan.

Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan Rasio S/N pada kondisi optimum untuk mendapatkan μ prediksi. Kemudian hasil prediksi tersebut dibandingkan dengan eksperimen konfirmasi. Adapun langkah-langkah μ prediksi adalah sebagai berikut :

- a. μ prediksi = Estimasi nilai Rasio S/N yang optimum.
- b. Menghitung selang kepercayaan (*confidence interval*)

$$Confidence\ interval\ (CI) = \mu\ prediksi \pm \sqrt{F_{\alpha, v1, v2} \cdot x V_e x \left[\frac{1}{n_{eff}} \right]} \dots(2.39)$$

- c. Menghitung SNR data hasil eksperimen prediksi

$$SNR = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} y_i^2 \right] \dots\dots\dots(2.40)$$

- d. Kesimpulan

Jika nilai Rasio S/N data hasil eksperimen prediksi masih berada dalam batas *confidence interval* (CI) maka dapat disimpulkan bahwa Rasio S/N hasil eksperimen usulan sesuai dengan eksperimen prediksi. Begitu pula sebaliknya.

2.4.10. Uji Prediksi Regresi Linier

Uji prediksi menggunakan analisa regresi berdasarkan data yang diperoleh dari hasil eksperimen yang sudah pernah dilakukan. Tujuan adanya uji prediksi untuk melihat secara keseluruhan

eksperimen yang seharusnya dilakukan. Uji prediksi dilakukan karena pada eksperimen Taguchi hanya ada 8 (delapan) *trial* atau 8 (delapan) eksperimen, yang sudah dianggap mewakili keseluruhan eksperimen yang seharusnya dilakukan.

Analisis regresi memiliki 3 kegunaan yaitu, deskripsi, kendali, dan prediksi (peramalan). Tetapi manfaat utama dari kebanyakan penyelidikan statistik dalam dunia bisnis dan ekonomi adalah mengadakan prediksi atau peramalan. Dalam analisis regresi dikenal dua macam variabel atau perubah yaitu variabel bebas (*independent variabel*) dan variabel tidak bebas (*dependent variabel*). Variabel bebas adalah variabel yang telah diketahui nilainya, sedangkan variabel tidak bebas adalah variabel yang nilainya belum diketahui dan yang akan diramalkan.

1. Regresi Linier Sederhana

Regresi linier sederhana mengamati pengaruh satu variabel bebas terhadap variabel tidak bebas.

Secara matematis regresi linier sederhana dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$\hat{y} = a + bX \dots\dots\dots(2.41)$$

Dimana:

\hat{y} = variabel yang diramalkan (variabel *dependent*)

X = variabel yang diketahui (variabel *independent*)

a = besarnya nilai \hat{y} pada saat $X = 0$

b = besarnya nilai perubahan nilai \hat{y} apabila nilai X bertambah satu satuan disebut koefisien regresi.

Untuk mencari nilai-nilai koefisien regresi b atau nilai a dapat digunakan metode *Least Square*. Dengan rumus :

$$b = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \dots\dots\dots(2.42)$$

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) - b \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)}{n} \dots\dots\dots(2.43)$$

2. Regresi Linier Berganda

Regresi linier berganda mengamati pengaruh lebih dari satu variabel bebas (*independent variabel*) terhadap variabel tidak bebas (*dependent variabel*), minimal ada dua buah variabel bebas. Secara sistematis regresi linier berganda dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \dots\dots\dots(2.44)$$

Dimana:

\hat{Y} = Variabel yang diramalkan (*dependent variabel*)

a = Konstanta (nilai \hat{Y} apabila $X_1, X_2, \dots, X_n = 0$)

$b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ = Koefisien regresi (nilai peningkatan ataupun penurunan).

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ = Variabel yang diketahui (*independent variabel*)

Menurut Usman, 2006. Koefisien arah regresi linier dinyatakan dengan huruf b yang juga menyatakan rata-rata variabel Y , untuk setiap variabel X sebesar satu bagian. Maksudnya ialah bila harga b positif, maka variabel Y akan mengalami kenaikan atau penambahan. Sebaliknya bila b negatif, maka variabel Y akan mengalami penurunan. Data yang digunakan biasanya berskala interval atau rasio.

Untuk mencari nilai $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ dapat digunakan beberapa cara yaitu:

n Persamaan Normal

$$\sum Y = an + b_1 \sum X_1 + b_2 \sum X_2 + \dots + b_n \sum X_n$$

$$\sum X_1 Y = a \sum X_1 + b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1 X_2 + \dots + b_n \sum X_1 X_n$$

$$\sum X_2 Y = a \sum X_2 + b_1 \sum X_2 X_1 + b_2 \sum X_2^2 + \dots + b_n \sum X_2 X_n$$

$$\sum X_n Y = a \sum X_n + b_1 \sum X_n X_1 + b_2 \sum X_n X_2 + \dots + b_n \sum X_n^2$$

Eliminasi Gauss :

$$\begin{pmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 & \dots & \sum X_n \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 & \dots & \sum X_1 X_n \\ \sum X_2 & \sum X_2 X_1 & \sum X_2^2 & \dots & \sum X_2 X_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum X_n & \sum X_n X_1 & \sum X_n X_2 & \dots & \sum X_n^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum Y \\ \sum Y.X_1 \\ \sum Y.X_2 \\ \dots \\ \sum Y.X_n \end{pmatrix}$$

Determinan :

$$\begin{pmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 \\ \sum X_2 & \sum X_2 X_1 & \sum X_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum Y \\ \sum Y.X_1 \\ \sum Y.X_2 \end{pmatrix}$$

$$a = \frac{a^{-1}}{R^{-1}}, \quad b_1 = \frac{b_1^{-1}}{R^{-1}}, \quad b_2 = \frac{b_2^{-1}}{R^{-1}} \dots \dots \dots (2.45)$$

Dimana:

R^{-1} = determinan matriks R

b_1^{-1} = determinan b_1

b_2^{-1} = determinan b_2

2.5. Taguchi Multi Respon Signal to Noise (MRSN)

Langkah-langkah yang sistematis dalam melakukan eksperimen multi respon dengan menggunakan *Multi Respon Signal to Noise Ratio* (MRSN) terdiri dari beberapa tahapan yaitu :

1) Menghitung *Quality Loss*

Kunci keberhasilan perusahaan industri pada persaingan global terletak pada kemampuan perusahaan untuk memenuhi kepuasan konsumen (*Quality*), biaya (*cost*), dan waktu penyerahaan. Penolakan produk oleh pelanggan akibat ketidaksesuaian spesifikasi produk yang ditawarkan dapat merugikan perusahaan. Fungsi kerugian mutu bertujuan untuk mengidentifikasi dan menghitung kerugian mutu yang terjadi, yang meliputi kerugian biaya kehilangan peluang (*opportunity cost*), biaya garansi (*waranty cost*), biaya pelayanan (*service cost*), biaya inspeksi kedalam (*inspection cost*), biaya pengerjaan ulang atau perbaikan (*rework cost*), biaya sisa produksi (*scrap cost*) maupun biaya komplain. Untuk mengetahui besarnya kerugian akibat dari produk yang dihasilkan tidak sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan salah satu cara adalah dengan melakukan pengukuran fungsi rugi kualitas (QLF). Fungsi kerugian mutu dapat ditunjukkan dalam rumus kuadrat sederhana yaitu :

$$k = L / \Delta^2 \dots\dots\dots(2.46)$$

Keterangan :

L = kerugian (*quality loss*)

k = konstanta

Δ^2 = deviasi kuadrat dari nilai target

2) Menghitung *quality loss* (L_{ij}) untuk setiap *trial*. Untuk karakteristik kualitas: