

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gelombang Elektromagnetik

Maxwell adalah salah seorang ilmuwan yang melakukan penelitian mengenai gelombang elektromagnetik. Persamaan-persamaan yang dikemukakan oleh Maxwell memperkirakan mengenai perilaku gelombang elektromagnetik dalam hal fluktuasi medan listrik dan medan magnetik dalam ruang. Maxwell menunjukkan bahwa teori optik yang mempelajari cahaya tampak adalah cabang dari elektromagnetisasi (Halliday dan Resnick dalam Brogren, 2004).

Radiasi elektromagnetik dapat digambarkan dalam bentuk aliran foton yang merupakan partikel tidak bermassa dengan setiap partikelnya merambat pada kecepatan cahaya. Setiap foton memiliki sebuah energi kuantum dan merupakan pembeda satu satunya antara berbagai macam radiasi elektromagnetik. Variasi gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan dalam bentuk energi foton, frekuensi atau panjang gelombang. Panjang gelombang cahaya dalam pembahasan mengenai bahan optik sering dinyatakan dalam nanometer. (Brogren, 2004).

2.2 Sumber Cahaya

Semua benda yang mampu memancarkan cahaya dapat disebut sebagai sumber cahaya. Sumber cahaya dapat dikategorikan menjadi sumber cahaya alamiah dan sumber cahaya buatan. Sumber cahaya alamiah terbesar yang dapat ditemukan berasal dari matahari sedangkan sumber cahaya buatan dapat diperoleh

dari lampu. Perbedaan terbesar diantara keduanya berada pada jumlah intensitas cahaya yang mampu dipancarkan ke area tertentu.

2.2.1 Cahaya matahari

Cahaya matahari yang sampai ke bumi berasal dari reaksi termonuklir. Reaksi termonuklir atau reaksi rantai proton-proton (reaksi p-p) terjadi setiap saat didalam bagian inti matahari. Reaksi ini menyebabkan terjadinya fusi dari empat buah proton membentuk inti baru yang mengandung dua proton dan dua neutron. Energi yang dihasilkan dari reaksi termonuklir tersebut adalah sebesar 25 MeV atau $0,4 \times 10^{-4}$ erg. Berdasarkan rumus energi, maka kuantitas energi matahari yang dihasilkan dari reaksi fusi pada inti matahari setiap detiknya akan semakin besar dengan total energi berjumlah tak berhingga. (Septiadi et al., 2009).

Energi matahari tersebut menyebar ke seluruh luar angkasa dan tidak mengalami perubahan karakteristik apapun karena di luar angkasa hampir tidak ada materi yang dapat mempengaruhi. Besarnya energi yang dipancarkan turun monotonik seiring dengan kuadrat jarak yang telah ditempuh dari matahari, dan ketika sampai di batas terluar atmosfer bumi, jumlah intensitas cahaya matahari berkisar antara 1360 W/m^2 (*solar constant*) (eesc.colombia, 2012).

Radiasi sinar matahari yang melewati atmosfer dalam perjalanan ke bumi akan mengalami pengurangan sekitar 30%. Redaman ini disebabkan oleh difusi oleh molekul di atmosfer, aerosol, partikel debu dan penyerapan oleh gas atmosfer, seperti oksigen, ozon, uap air dan karbon dioksida. Setelah mengalami difusi dan penyerapan yang diikuti dengan radiasi ulang parsial ke ruang angkasa, sekitar 1000 W/m^2 energi mencapai tanah apabila kondisi cuaca cerah. Jumlah ini

sangat bervariasi dari satu titik waktu yang lain karena kondisi atmosfer dan pergerakan Bumi terhadap Matahari (Perers dalam Brogren, 2004). Nilai rerata radiasi sinar matahari difusi adalah 15 sampai 20% dari radiasi total yang dipancarkan (Kulkarni, 2007). Bentuk bumi yang bulat memberikan perbedaan tingkat radiasi di berbagai tempat di bumi, ditambah dengan kondisi permukaan bumi yang mengalami *tilt* terhadap cahaya datang. Poros bumi mengalami *tilt* sebesar $23,5^\circ$ terhadap bidang pergerakan orbit. (eesc.colombia, 2012).

2.2.2 Cahaya lampu

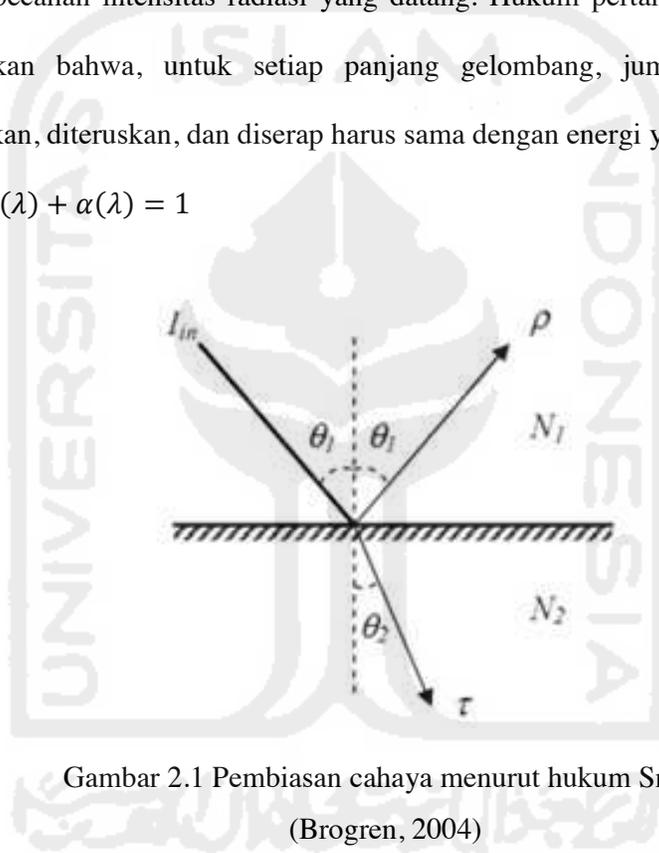
Sumber cahaya yang berasal dari sebuah lampu merupakan contoh sumber cahaya buatan. Warnanya ditentukan oleh faktor frekuensi dan panjang gelombang. Kecerahan, distribusi cahaya serta efektifitas konversi listrik ke cahaya juga menjadi faktor ukur untuk sebuah sumber cahaya buatan. Kategori sumber cahaya buatan ditentukan oleh teknologi yang digunakan untuk menghasilkan cahaya tersebut. Lima sumber cahaya buatan yang paling umum adalah *incandescent lamp*, *compact fluorescent lamp*, *fluorescent tube*, *discharge lamp* dan *LED*. (electrical-knowhow, 2012)

Lampu halogen merupakan salah satu jenis *incandescent lamp* namun memiliki ukuran lebih kecil dan menggunakan gas halogen didalam lampunya. Bentuknya yang ringkas dan menghasilkan lumen tinggi menjadi alasan untuk lampu ini digunakan sebagai standar lampu kerja dan pencahayaan dalam industri film/televisi. Kelebihan jenis halogen selain ukurannya yang kecil adalah memiliki *color temperature* yang lebih baik dibanding lampu standar tungsten serta lebih mirip dengan cahaya matahari. (edisontechcenter, 2013)

2.3 Sifat Optik Bahan

Radiasi elektromagnetik apabila menabrak pada suatu bahan, maka kemungkinan yang terjadi adalah dipantulkan, diteruskan atau diserap. Sifat optik pemantulan ρ , penerusan τ , dan penyerapan α , dari suatu bahan didefinisikan sebagai pecahan intensitas radiasi yang datang. Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa, untuk setiap panjang gelombang, jumlah energi yang dipantulkan, diteruskan, dan diserap harus sama dengan energi yang datang.

$$\rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \quad (1)$$



Gambar 2.1 Pembiasan cahaya menurut hukum Snell.

(Brogren, 2004)

I_{in} adalah intensitas cahaya datang, ρ intensitas cahaya terpantul, dan τ intensitas yang dibiaskan melewati bahan (Stover dalam Brogren, 2004).

Benda-benda memiliki tingkat pantulan spektrum yang merupakan fungsi sudut jatuh dari cahaya datang. Warna sebuah benda adalah fungsi dari spektrum warna cahaya datang dan spektrum warna pantulan pada permukaan benda. Benda

yang menyerap seluruh spektrum warna kecuali merah akan tampak berwarna merah pada penyinaran cahaya warna putih (Siggraph, 2014).

2.4 Sel Surya

Sel surya merupakan piranti *photovoltaic* yang menghasilkan listrik arus searah dalam satuan Watt atau kilowatt dari bahan semikonduktor ketika disinari oleh foton. Selama cahaya menyinari permukaan sel surya maka akan selalu dihasilkan daya listrik. Bahan pembentuk sel surya disebut sebagai bahan semikonduktor dengan sifat ikatan elektron yang lemah menempati pita energi yang disebut pita valensi. Kelebihan utama sel surya adalah sumber energi masukan tidak terbatas, tidak menghasilkan emisi berbahaya, *modular*, biaya operasional murah, tingkat keselamatan tinggi, tahan lama, mudah dipasang sedangkan kekurangannya membutuhkan biaya pemasangan tinggi dan belum banyak tersedia piranti penyimpanan energi yang efisien serta ekonomis (Luque dan Hegedus, 2003).

2.4.1 Semikonduktor

Bahan semikonduktor adalah sebuah kelompok atom berelemen empat dengan elektron valensi empat berstruktur intan. Setiap atom dalam struktur intan masing-masing memiliki empat tetangga terdekat dan berbagi salah satu elektron valensi dengan tetangganya. Hal ini menghasilkan ikatan pasangan elektron antar atom. Struktur pita semikonduktor pada suhu nol absolut mirip dengan isolator dan memiliki energi *band gap* antara pita valensi dan pita konduksi (Nordling dan Osterman dalam Brogren, 2004). Saat suhu meningkat, energi panas

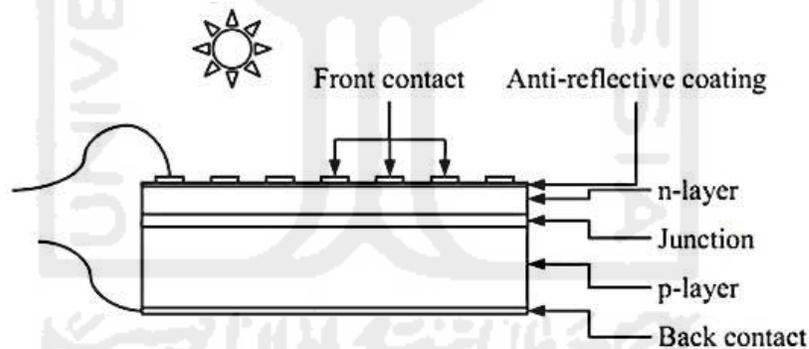
mengeksitasi elektron dari pita valensi melewati *band gap* menuju pita konduksi. Setelah elektron berada dalam pita konduksi, terdapat lubang di pita valensi dan tahanan menurun karena peningkatan suhu maka proses konduksi dimulai. Tahanan pada bahan jenis silikon dalam suhu kamar akan masih tinggi dan tidak menurun tajam sampai suhunya benar-benar berada diatas suhu kamar (Dixon dalam Brogren, 2004).

Sejumlah kecil atom pengotor apabila ditambahkan ke semikonduktor maka dikatakan semikonduktor tersebut mengalami *doping* (pengotoran). Pengotoran bahan semikonduktor dengan atom donor menghasilkan semikonduktor tipe n karena adanya kelebihan elektron bebas yang dianggap sebagai kondisi negatif. Penggunaan atom berelektron valensi tiga mengakibatkan terjadinya kekurangan elektron atau terbentuknya lubang pada ikatan pasangan elektron dan lubang ini sering dianggap sebagai kondisi positif sehingga pengotoran semikonduktor dengan atom valensi tiga menghasilkan semikonduktor tipe p. Penggabungan semikonduktor tipe p dengan tipe n akan menghasilkan sambungan p-n dan lapisan deplesi. Pembahasan berikutnya mengenai sel surya akan memanfaatkan pendekatan berdasarkan adanya sambungan p-n. (Brogren, 2004).

2.4.2 Konversi fotolistrik

Sel fotovoltaik mengubah cahaya menjadi energi listrik dalam bentuk arus yang searah. Kebanyakan sel fotovoltaik yang terbuat dari bahan semikonduktor seperti *silicon*, *gallium arsenide*, *copper-indium-diselenide* dan *cadmium*

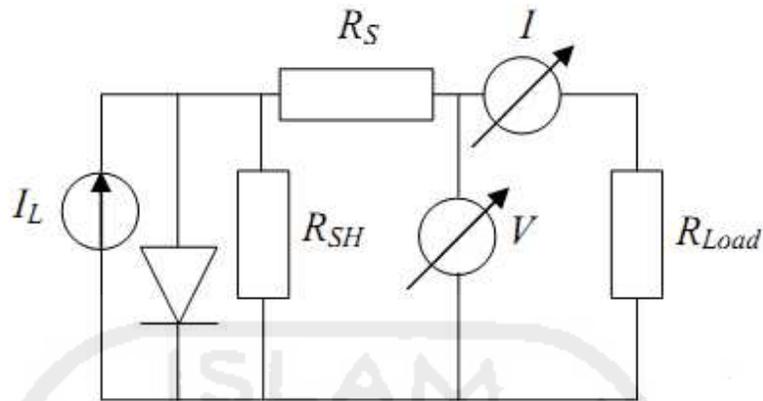
telluride cocok digunakan dalam konversi radiasi cahaya matahari. Gambar 2.2 menunjukkan sambungan p-n pada sel surya. Umumnya sel fotovoltaik dari bahan *mono-crystalline silicon* menyerap cahaya pada area di dekat sambungan p-n dalam semikonduktor. Lapisan tipe-n, yaitu bagian depan sel surya dilapisi oleh oksida penghantar transparan atau *grid* logam yang dirancang hanya mencakup sebagian kecil dari permukaan. Permukaan sel sering dibuat bertekstur atau diberi lapisan anti pantul pada permukaan untuk meminimalkan rugi pemantulan, dengan penambahan penutup berbahan kaca untuk menjaga stabilitas struktur dan melindungi perangkat dari degradasi. Lapisan tipe-p di bawah sambungan terhubung dengan bagian belakang oleh kontak logam yang menutupi seluruh permukaan bagian belakang.



Gambar 2.2 Sel surya tipe sambungan p-n.

(Brogren, 2004)

Karakteristik sel surya tipe sambungan p-n dapat digambarkan dengan rangkaian ekuivalen sebuah *constant current generator* (I_L), sebuah dioda, tahanan dalam seri (R_s), tahanan shunt (R_{sh}) dan tahanan beban (R_L) (Brogren, 2004) dimana V nilai tegangan dan I arus.



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen sel surya.

(Brogren, 2004)

Terdapat beberapa parameter sel surya meliputi daya maksimal (P_{max}), tegangan maksimal saat daya maksimal dicapai (V_{max}), arus maksimal saat daya maksimal tercapai (I_{max}), arus saat tegangan sel surya bernilai nol (I_{sc}), tegangan saat arus sel surya bernilai nol (V_{oc}), rasio daya sel surya terhadap intensitas radiasi cahaya (η) dan rasio daya maksimal sel surya terhadap perkalian antara V_{oc} dan I_{sc} (FF). Berdasarkan parameter sel surya tersebut dapat kita hitung besarnya efisiensi konversi (Eff_c) yang dihasilkan menggunakan rumus berikut (Osueke et al., 2011) :

$$Eff_c = \frac{\text{efisiensi maksimal sel surya } (\eta)}{\text{daya luaran maksimal sel surya}} \times P \quad (2)$$

dimana:

P = daya sel surya.

Produktifitas sel surya dapat diperhitungkan berdasarkan hasil efisiensi konversi.

Produktifitas digunakan untuk menunjukkan seberapa besar kemampuan efisiensi

sel surya dipergunakan secara optimal. Sebagai contoh jika sel surya memiliki $\eta = 18\%$ maka nilai produktifitasnya adalah sebagai berikut (Osueke et al.,2011).

$$Pr = \frac{100}{18} \times Eff_c \quad (3)$$

2.4.3 *Electrical characteristics*

Tegangan modul sel surya merupakan nilai tegangan yang timbul oleh karena pemasangan sel secara seri dikalikan nilai tegangan satu buah sel, sedang arus modul adalah nilai arus yang timbul oleh pemasangan sel secara parallel dikalikan nilai arus satu buah sel. Terlepas dari bagaimanapun cara pemasangannya nilai daya modul selalu setara dengan daya satu buah sel dikalikan jumlah yang digunakan.

Pembuat biasanya menyediakan spesifikasi listrik tertentu (kondisi hubung singkat, hubung buka dan daya maksimal) dari kurva $I-V$ diukur pada kondisi standar (STC) yaitu penyinaran $1kW/m^2$, distribusi spectral AM1.5 dan suhu sel $25^\circ C$. Daya maksimum modul pada kondisi STC disebut daya puncak dalam satuan *watt-peak* (Wp).

Kondisi lapangan tidaklah sama seperti kondisi standar, melainkan sangat bervariasi dan mempengaruhi kinerja listrik sel surya, mengakibatkan kerugian efisiensi dibanding nilai nominal STC .

2.4.4 Spectral response

Spectral response, $SR(\lambda)$, sel surya memungkinkan peneliti untuk mengetahui bagaimana pengaruh *foton* dengan panjang gelombang (energi) berbeda-beda terhadap nilai arus hubung singkat. *Spectral response* didefinisikan sebagai besarnya arus hubung singkat yang dihasilkan oleh sebuah panjang gelombang cahaya tertentu. Keterkaitan antara nilai arus hubung singkat sel surya terhadap *spectral response* ditunjukkan oleh rumus berikut ini.

$$I_{sc} = \int_{\lambda} SR_{ext}(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Spectral response sel surya dapat diperoleh melalui sebuah pengukuran dalam eksperimen (Luque dan Hegedus, 2003).

2.4.5 Fotovoltaik moderen

Silikon adalah bahan yang paling umum digunakan untuk produksi sel fotovoltaik karena modul kristal silikon adalah jenis yang paling berkembang dan lazim digunakan. Sel kristal silikon konvensional biasanya memiliki tebal 0,3-0,4mm (Sigurd dalam Brogren, 2004) yang ditentukan oleh koefisien penyerapan bahannya. Kristal silikon harus tebal karena memiliki kelemahan pada tingkat penyerapan. Bahan semikonduktor terbuat dari campuran memiliki serapan lebih kuat dari silikon. Ini berarti sel-sel semikonduktor campuran dapat dibuat tipis namun tetap efisien. Sel berbahan film tipis dibuat dari sejumlah lapisan dengan ketebalan beberapa mikron atau kurang dan diletakkan pada bahan substrat kaca atau logam menggunakan proses *vapour deposition* fisik atau kimia. Sel berbahan

film tipis dapat dibuat dari campuran *copper-indium-gallium-diselenide* (CIGS) dan *cadmium telluride* (CdTe), serta *amorphous silicon* (α -Si) seperti yang ditemukan pada kalkulator saku. Sel berbahan film tipis harganya lebih murah dibandingkan dengan sel kristal silikon namun demikian efisiensinya tidak sebaik sel kristal silikon (Green, 2003).

2.5 Konsentrator Sel Surya

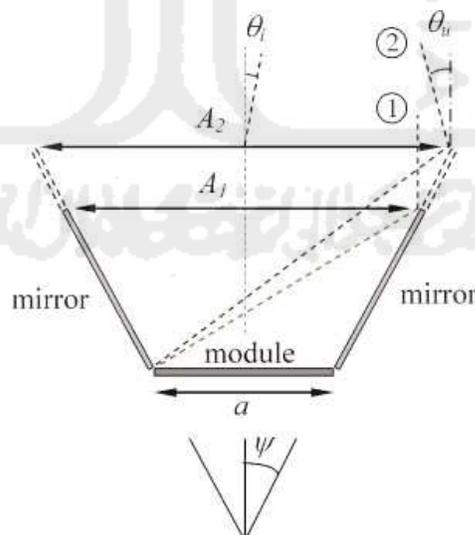
Intensitas cahaya yang jatuh ke permukaan sel surya dapat ditingkatkan menggunakan sebuah konsentrator sel surya. Mengoperasikan sel surya dalam kondisi penyinaran terkonsentrasi memberikan dua keuntungan yaitu lebih sedikit area sel surya dibutuhkan untuk mengumpulkan cahaya dan adanya peningkatan efisiensi. Apabila sebuah sumber cahaya yaitu cahaya matahari dikonsentrasikan sebesar X kali maka arus hubung singkat sel surya menjadi X kali lipatnya. Peningkatan konsentrasi cahaya masukan mampu meningkatkan efisiensi sel surya penerimanya, namun seiring dengan peningkatan suhu sel akan menurunkan tegangan hubung buka dan juga efisiensi sel itu sendiri. Nilai *fill factor* kondisi terkonsentrasi turun setiap konsentrasi meningkat X kali, sedangkan arus menurun karena *parasitic series resistance* yang timbul (Luque dan Hegedus, 2003).

2.5.1 Pemantul planar

Prinsip penggunaan pemantul planar adalah untuk meningkatkan intensitas cahaya matahari pada sebuah penerima. Dua keuntungan utama menggunakan konsentrator cahaya adalah lebih sedikit area sel surya yang dibutuhkan untuk menghasilkan listrik dan memberikan keuntungan pada sisi efisiensi dimana

peningkatan konsentrasi penyinaran akan meningkatkan efisiensi (Luque dan Hegedus, 2003). Keuntungan lain penggunaan pemantul dalam sistem fotovoltaik adalah distribusi radiasi pada penerima lebih seragam dibandingkan jika menggunakan pemantul berbentuk kurva. Kekurangan mendasar yang ada pada pemantul tipe planar adalah rendahnya rasio konsentrasi yang didapatkan. Biasanya rasio konsentrasi yang diperoleh dari sistem dengan pemantul planar sekitar 1,5 (Ronnelid et al. dalam Brogren, 2004). Jika cahaya matahari dikonsentrasikan sebesar X kali maka nilai arus hubung singkatnya menjadi X kali penyinaran satu matahari.

Konstruksi pemantul yang digunakan untuk mengkolleksikan cahaya matahari pada sel surya disebut dengan *V-trough*. Konstruksinya sederhana dibentuk dari kaca yang dipasang saling bersilangan dengan sudut ψ seperti terlihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Pemantul tipe *V-trough*.
(Garcia et al., 2008)

Geometri pemantul jenis V-trough dipengaruhi oleh dua hal: sudut pelewatan (ψ) dan konsentrasi geometris (C). Nilai konsentrasi geometris merupakan perbandingan antara lebar area pelewatan (A) terhadap ukuran lebar sel surya (a) (Fraidenraich, 1998)

$$C = \frac{A}{a} \quad (5)$$

Guna menghindari terjadinya pemanasan terpusat, distribusi cahaya jatuh harus merata di seluruh permukaan area penyerapan. Sebuah konsentrator ideal dengan posisi menghadap sempurna pada matahari menggunakan dua cermin pemantul akan mengikuti persamaan konsentrasi geometris (Fraidenraich, 1998) :

$$C = \frac{A_1}{a} = 1 + 2 \cos 2\psi \quad (N = 1) \quad (6)$$

Penggunaan cermin lebih lebar untuk mengatasi kondisi dimana posisi konsentrator tidak menghadap sempurna ke arah matahari menyebabkan konsentrator masih mampu menerima cahaya paralel yang jatuh pada sudut penerimaan maksimum θ_u . Kondisi ini mengakibatkan ukuran $A_2 > A_1$ dan meningkatkan nilai konsentrasi geometris menjadi:

$$C = \frac{A_2}{a} > 1 + 2 \cos 2\psi \quad (N = 1) \quad (7)$$

Batas nilai sudut pelewatan (ψ) yang memenuhi kondisi distribusi cahaya jatuh merata di seluruh permukaan area penyerapan untuk mode pemantulan bernilai 1 ($N=1$) dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{90 - \theta_u}{2} \geq \psi \geq \frac{90 + \theta_u}{4} \quad \theta_u \leq \psi \quad (8)$$

Konsentrasi optik (Cop) didefinisikan sebagai hasil bagi dari radiasi sinar di bagian *receptor* dan *entrance aperture*. Pada cermin ideal yang memiliki reflektifitas sama dengan satu, konsentrasi optik sama dengan perkalian dari konsentrasi geometrik dan fungsi sudut penerimaan (*angular acceptance*). Persamaan konsentrasi optik yang memberikan radiasi cahaya seragam dituliskan sebagai berikut (Garcia et al.,2008).

$$C_{op}(\theta_i) = 1 + 2 \cos(2\psi) \quad |\theta_i| \leq \theta_u \quad (9)$$

Kenyataannya konsentrasi optik dapat berkurang karena reflektifitas cermin (ρ) nilainya kurang dari satu. Untuk mengakomodasi hal ini, Persamaan (5) dapat ditulis dalam bentuk:

$$C_{op}(\theta_i) = 1 + 2 \rho \cos(2\psi) \quad |\theta_i| \leq \theta_u \quad (10)$$

Aspek lain yang perlu diperhatikan adalah bahwa reflektifitas cermin sangat tergantung pada panjang gelombang, sehingga konsentrasi optik tergantung pada sudut elevasi matahari γ_s . Seiring peningkatan sudut elevasi matahari massa udara menjadi berkurang sehingga spektrum cahaya matahari bergeser ke arah ultraviolet.

2.5.2 Bahan pemantul untuk konsentrator

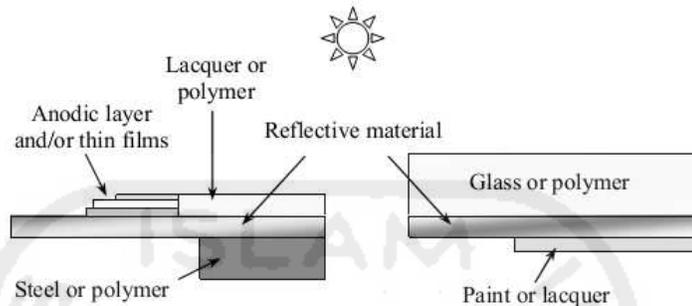
Penggunaan pemantul sebagai konsentrator sangat dipengaruhi oleh tingkat pemantulan bahan yang digunakan. Semakin baik tingkat pemantulannya maka semakin optimal dalam mengkonsentrasikan cahaya jatuh pada permukaannya. Tingkat pemantulan bahan pemantul bervariasi dari nol sampai

dengan satu menurut jenis bahan dan diharapkan mampu memantulkan seluruh daerah panjang gelombang spektrum sinar matahari 300-2500nm. Panjang gelombang cahaya melebihi 1100nm dalam sistem konversi sel surya berbahan silikon hanya akan menghasilkan pemanasan dan tidak berkontribusi pada konversi fotoelektrik. Bahan pemantul dalam sistem konversi energi matahari harus memenuhi beberapa persyaratan (Brogren, 2004):

1. Memantulkan sebanyak mungkin cahaya matahari datang ke arah sel fotovoltaik.
2. Bahan pemantul dan penyangganya harus lebih murah dibanding sel surya yang digunakan.
3. Permukaan pemantul mudah dibersihkan dengan bahan deterjen yang murah tanpa merusak sifat optiknya.
4. Bahan pemantul harus ringan serta mudah dipasang.
5. Bahan pemantul terbuat dari bahan yang tidak berbahaya dan memiliki tampilan menarik karena ditempatkan pada tempat yang terbuka dan mudah terlihat.
6. Konstruksi pemantul kuat menahan tiupan angin yang kuat.

Bahan dasar pemantul dapat berupa logam atau non logam yang memiliki tingkat pemantulan terhadap cahaya matahari. Perak dan aluminium adalah bahan pemantul terbaik dengan tingkat pemantulan mencapai 97% dan 92% (Granqvist dalam Brogren, 2004). Penggunaan bahan pemantul dari logam tipis atau lembaran diterapkan dengan melekatkan bahan tersebut ke permukaan bahan lain

yang lebih tebal dan dilapisi dengan kaca atau bahan polimer untuk menjaga kondisi permukaan.



Gambar 2.5 Struktur bahan pemantul.
(Brogren, 2004)

2.6 Kualitas dan Pengendalian kualitas

Menurut defnisi konvensional, kualitas biasanya menggambarkan karakteristik langsung dari suatu produk seperti performansi (*performance*), kehandalan (*reliability*), mudah dalam penggunaan (*easy to use*), estetika (*esthetics*) dan sebagainya. Menurut definisi strategik, kualitas adalah segala sesuatu yang mampu memenuhi keinginan atau kebutuhan pelanggan (*Meeting The Needs Of Customers*)(Gaspersz, 2001).

Kualitas menurut Taguchi ada dua segi umum, yaitu kualitas rancangan dan kualitas kecocokan. Kualitas rancangan adalah variasi tingkat kualitas yang ada pada suatu produk yang memang disengaja. Kualitas kecocokan adalah seberapa baik produk itu sesuai dengan spesifikasi dan kelonggaran yang diisyaratkan oleh rancangan. Kualitas kecocokan itu dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk pemilihan proses pembuatan, latihan dan pengawasan kerja, jenis

sistem jaminan kualitas (pengendalian proses, uji, aktivitas pemeriksaan, dan sebagainya) yang digunakan, seberapa jauh prosedur jaminan kualitas ini diikuti dan motivasi kerja untuk mencapai kualitas (Soejanto 2009).

Pengendalian kualitas dapat diartikan sebagai proses pengukuran yang dilakukan selama perancangan produk atau proses. Aktivitas pengendalian kualitas mencakup dalam setiap fase dari penelitian dan pengembangan produk, perancangan proses produksi, dan kepuasan konsumen.

2.6.1 Pengendalian kualitas secara *Off-Line*

Pada bagian ini perancangan eksperimen merupakan peralatan yang sangat fundamental, dimana teknik ini mengidentifikasi sumber dari variasi dan menentukan perancangan dan proses yang optimal. Pengendalian kualitas secara *off-line* dibagi menjadi 3 (tiga) tahap (Peace, 1993):

1. Tahap I: Perancangan Konsep

Tahap ini berhubungan dengan pemunculan ide dalam kegiatan perancangan dan pengembangan produk, dimana ide tersebut dari keinginan konsumen. Model atau metode yang digunakan pada tahap ini antara lain :

- a. *Quality Function Deployment* : menterjemahkan keinginan konsumen ke dalam istilah teknis.

- b. *Dynamic Signal-to-Noise Optimization*: teknik untuk mengoptimalkan *engineering function, resulting in robust, dan tunable technology*.
- c. *Theory of Inventive Problem Solving* : Suatu koleksi tool yang didapat dari analisa literature yang berguna untuk membangkitkan pemecahan masalah teknis yang inovatif.
- d. *Design of Experiments* : Eksperimen faktorial penuh dan faktorial parsial untuk dapat mengetahui efek dari beberapa parameter serentak.
- e. *Competitive Technology Assesment*: melakukan *benchmark* terhadap sifat *robustness* dari teknologi pengembangan internal dan eksternal.
- f. *Pugh Concept Selection Process* : Mengumpulkan dan menyajikan informasi dari suatu *system expert*, dengan membandingkan beberapa keunggulan dan kualitas dari berbagai konsep untuk dikembangkan sehingga didapat konsep yang superior.

2. Tahap II: Perancangan Parameter

Tahap ini berfungsi untuk mengoptimalisasi level dari faktor pengendali terhadap efek yang ditimbulkan oleh faktor lain sehingga produk yang ditimbulkan dapat tangguh terhadap noise. Karena itu perancangan parameter sering disebut sebagai *Robust Design*.

Model atau metode yang digunakan dalam tahap ini antara lain :

- a. *Engineering Analysis* : Menggunakan pelatihan, pengalaman, dan percobaan untuk menemukan variabilitas dan respon yang efektif.
- b. *The System P-Diagram* : Suatu model yang tangguh untuk menggambarkan dan menggolongkan berbagai parameter yang mempengaruhi *output system*.
- c. *Dynamic and Static Signal-to-Noise Optimization*: Mengoptimalkan suatu perancangan parameter untuk mengurangi variabilitas dengan menggunakan perhitungan rasio *signal-to-noise*.
- d. *Crossed Array Experiment* : Sebuah perancangan eksperimen khusus dengan cara memanfaatkan interaksi antara faktor kendali dan faktor derau sehingga membuat sistem lebih tangguh.

3. Tahap III: Perancangan Toleransi

Merupakan tahap terakhir dimana dibuat matrik *orthogonal*, *loss function*, dan ANOVA untuk menyeimbangkan biaya dan kualitas dari suatu produk.

Model atau metode yang digunakan pada tahap ini antara lain :

- a. *Quality Loss Function* : Persamaan yang menghubungkan variasi dari performansi biaya produk dengan level deviasi dari target.
- b. *Analysis of Variance (ANOVA)* : Suatu teknis statistik yang secara kuantitatif menentukan kontribusi variasi total, yang dibentuk dari setiap faktor derau dan faktor kendali.

- c. *Design of Experiments* : Eksperimen faktorial penuh dan faktorial parsial untuk dapat mengetahui efek dari beberapa parameter secara serentak.

2.6.2 Pengendalian kualitas secara *On-Line*

Pengendalian kualitas secara *on-line* merupakan suatu aktivitas untuk mengamati dan mengendalikan kualitas pada setiap proses produksi secara langsung. Aktivitas ini sangat penting dalam menjaga agar biaya produksi menjadi rendah dan secara langsung pula dapat meningkatkan kualitas produk. Pengendalian kualitas secara *on-line* ini juga dapat mengontrol mesin – mesin produksi sehingga dapat mencegah terjadinya kerusakan pada mesin – mesin produksi tersebut. Beberapa model yang digunakan dalam melakukan pengendalian kualitas secara *on-line* :

- a. *Statistical Process Control* : Melakukan pengamatan, pengendalian, dan pengujian pada tiap tahap proses produksi agar dapat terjadi penyimpangan yang cukup besar.
- b. *Static Signal-to-Noise Ratio* : Mereduksi variasi dengan menggunakan aplikasi dari *robust design* untuk memecahkan permasalahan dalam proses produksi.
- c. *Compensation* : Berbagai rencana pengendalian untuk menjaga agar proses yang terjadi sesuai dengan target.
- d. *Loss Function-Based Process Control* : Pengurangan terhadap seluruh biaya produksi termasuk biaya per unit, biaya inspeksi, dan biaya set-up

yang diperlukan dalam pengendalian proses serta *quality loss* yang diakibatkan oleh sisa variasi pada output.

2.7 Rancangan Eksperimen (*Design Experiment*)

Design experiment adalah suatu rancangan percobaan (dengan tiap langkah atau tindakan yang betul-betul terdefinisikan) sedemikian sehingga informasi yang berhubungan dengan atau diperlukan untuk persoalan yang sedang diteliti dapat dikumpulkan (Sudjana,1991). Disain suatu eksperimen bertujuan untuk memperoleh atau mengumpulkan informasi sebanyak – banyaknya yang diperlukan dan berguna dalam melakukan penelitian persoalan yang akan dibahas. Penelitian hendaknya dilakukan se-efisien mungkin mengingat waktu, biaya, tenaga dan bahan yang harus digunakan dan *designexperiment* yang dibuat harus sesederhana mungkin. Jadi jelas hendaknya, bahwa *design experiment* berusaha untuk memperoleh informasi yang maksimum dengan menggunakan biaya yang minimum.

2.8 Prinsip Dasar dalam *Design Experiment*

Prinsip prinsip dasar dalam *design experiment*, antara lain:

1. Replikasi

Replikasi diartikan sebagai pengulangan eksperimen dasar. Dalam kenyataannya replikasi diperlukan oleh karena dapat :

- a. Memberikan tafsiran kekeliruan eksperimen yang dapat dipakai untuk menentukan panjang interval konfidens atau dapat digunakan sebagai

“*satuan dasar pengukuran* “ untuk penetapan taraf signifikan daripada perbedaan-perbedaan yang diamati.

- b. Menghasilkan taksiran yang lebih akurat untuk kekeliruan eksperimen
- c. Memungkinkan untuk memperoleh taksiran yang lebih baik mengenai efek rata-rata suatu faktor.

2. Pengacakan

Pada umumnya untuk setiap prosedur pengujian, asumsi-asumsi tertentu perlu diambil dan dipenuhi agar supaya pengujian yang dilakukan menjadi berlaku. Salah satu diantaranya adalah bahwa pengamatan-pengamatan berdistribusi secara *independent*. Asumsi ini sukar untuk dapat dipenuhi, akan tetapi dengan jalan berpedoman kepada prinsip sampel acak yang diambil dari sebuah populasi atau berpedoman pada perlakuan acak terhadap unit eksperimen, maka pengujian dapat dijalankan seakan-akan asumsi yang telah diambil terpenuhi. Pengacakan memungkinkan untuk melanjutkan langkah-langkah berikutnya dengan anggapan soal *independent* menjadi suatu kenyataan.

3. Kontrol lokal

Kontrol lokal merupakan sebagian daripada keseluruhan prinsip-prinsip *design* yang harus dilaksanakan. Biasanya merupakan langkah-langkah yang berbentuk penyimpangan, pengelompokkan dan pemblokkan unit-unit eksperimen yang digunakan dalam desain. (Sudjana, 1991)

2.9 Langkah-langkah Melaksanakan *Design Experiment*

Langkah-langkah dalam melaksanakan perancangan eksperimen, sebagai berikut (Sudjana, 1991):

- a. Menyatakan mengenai masalah atau persoalan yang akan dibahas.
 - b. Merumuskan hipotesa.
 - c. Menentukan teknik dan desain eksperimen yang diperlukan.
 - d. Memeriksa semua hasil yang mungkin dan latar belakang atau alasan supaya eksperimen setepat mungkin memberikan informasi yang diperlukan.
 - e. Mempertimbangkan semua hasil yang ditinjau dari prosedur statistika yang diharapkan berlaku untuk itu.
 - f. Melakukan eksperimen.
 - g. Penggunaan teknik statistika terhadap data hasil eksperimen.
 - h. Mengambil kesimpulan dengan jalan menggunakan atau memperhitungkan derajat kepercayaan yang wajar mengenai satuan – satuan yang dinilai.
 - i. Membandingkan kualitas proses yang baru dengan proses yang lama.
- Perancangan eksperimen (*design experiment*) terdiri dari dua macam yaitu perancangan eksperimen konvensional dan perancangan eksperimen Taguchi. Perancangan eksperimen konvensional sudah semakin tidak dilakukan pada saat sekarang, karena menghabiskan banyak waktu, biaya dan tenaga. Metode Taguchi sekarang banyak dilakukan, karena dalam metode Taguchi mempersingkat jumlah eksperimen yang dilakukan sehingga tidak menghabiskan banyak waktu, tenaga dan biaya.

2.10 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 matrik yang disebut matrik *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 variable-variabel input untuk masing-masing eksperimen (Peace, 1993).

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 et al., (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. Tidak semua perlakuan yang terdapat dalam *orthogonal array* dijalankan sehingga dapat mempersingkat waktu dan biaya. Filosofi Taguchi terhadap kualitas terdiri dari tiga buah konsep, yaitu:

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

2.10.1 Perancangan eksperimen Taguchi

Perancangan eksperimen merupakan evaluasi secara serentak terhadap dua atau lebih faktor (parameter) terhadap kemampuan mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk suatu proses tertentu (Peace, 1993).

Ada beberapa langkah yang diusulkan Taguchi untuk melakukan eksperimen secara sistematis, yaitu :

1. Menyatakan permasalahan yang akan dipecahkan
2. Menentukan tujuan penelitian
3. Menentukan metode pengukuran
4. Identifikasi faktor
5. Memisahkan faktor kontrol dan faktor *noise*
6. Menentukan level setiap faktor dan nilai faktor
7. Mengidentifikasi faktor yang mungkin berinteraksi
8. Menggambarkan *linier graph* untuk faktor kontrol dan interaksi.

9. Memilih *Orthogonal Array*
10. Pemasukkan faktor atau interaksi ke dalam kolom
11. Melakukan eksperimen
12. Analisa hasil eksperimen
13. Interpretasi hasil
14. Pemilihan level faktor untuk kondisi optimal
15. Perkiraan rata-rata proses pada kondisi optimal
16. Menjalankan eksperimen konfirmasi

Taguchi dibedakan menjadi dua yaitu Taguchi *single respon* dan Taguchi *multirespon*. Taguchi *single respon* hanya mempunyai satu variabel respon sehingga langsung didapatkan kombinasi optimal dari variabel respon tersebut. Taguchi *multirespon* mempunyai lebih dari satu variabel respon (minimal dua variabel respon), dan masing-masing variabel respon mempunyai kombinasi faktor yang berbeda sehingga diperlukan penanganan lebih lanjut untuk mendapatkan kombinasi faktor yang optimal untuk meningkatkan kualitas masing-masing variabel respon. Dua metode yang dapat digunakan untuk memecahkan permasalahan Taguchi *multirespon* adalah Metode MRSN (*Multi Respon Signal to Noise*) dan TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) untuk menentukan kondisi optimal pada tahapan desain parameter (Lee dan Chao, 1997).

2.10.2 Proses perancangan parameter

Dalam rancangan percobaan klasik menganggap bahwa semua faktor sebagai penyebab variasi. Jika faktor-faktor tersebut dikendalikan atau dihilangkan maka variasi dapat dikurangi sehingga kualitas meningkat. Tetapi tidak semua faktor yang berpengaruh dapat dikendalikan tanpa mengeluarkan biaya, sehingga diperlukan pendekatan lain untuk meningkatkan kualitas. Pendekatan yang digunakan oleh Taguchi dinamakan perancangan parameter. Taguchi membagi upaya untuk meningkatkan kualitas atas 3 (tiga) hal, yaitu :

- a. Perancangan Sistem (*System Design*). Yaitu upaya dimana konsep-konsep, ide-ide, metode baru dan lainnya dimunculkan untuk memberi peningkatan produk.
- b. Perancangan Parameter (*Parameter Design*). Digunakan untuk mencegah terjadi variabilitas, dimana parameter-parameter ditentukan untuk menghasilkan performansi yang baik.
- c. Perancangan Toleransi (*Tolerance Design*). Pada perancangan ini, kualitas ditingkatkan dengan mengetatkan toleransi pada parameter produk atau proses untuk mengurangi terjadinya variabilitas pada performansi produk.

2.10.3 Faktor terkendali dan faktor noise

Taguchi mengembangkan faktor perancangan dan pengembangan produk atau proses ke dalam dua kelompok yaitu faktor terkendali dan faktor *noise*. Faktor terkendali adalah faktor yang ditetapkan (atau dapat dikendalikan) oleh produsen selama tahap perancangan produk atau proses dan tidak dapat diubah

oleh konsumen. Sedangkan faktor *noise* adalah faktor yang tidak dapat dikendalikan langsung oleh produsen. Faktor *noise* dapat dibagi menjadi 3 (tiga), yaitu :

a. Faktor *noise eksternal*

Diartikan sebagai sumber-sumber variabilitas yang berasal dari luar produk.

b. Faktor *noise* dari unit ke unit

Merupakan hasil dari produksi dimana selalu ada perbedaan dari setiap item yang sejenis yang telah diproduksi. Disebut juga sebagai variasi toleransi

c. Faktor *noise* deteriorasi

Disebut juga noise internal karena faktor ini berasal dari sesuatu (internal) yang berubah dari proses atau degradasi dari komponen mesin yang memasuki *over time*.

Dalam perancangan eksperimen Taguchi, penanganan faktor noise melalui 3 (tiga) cara, yaitu :

- a. Dengan melakukan pengulangan terhadap masing-masing percobaan.
- b. Dengan memasukkan faktor *noise* tersebut kedalam percobaan dengan menempatkannya diluar faktor terkendali.
- c. Dengan menganggap faktor terkendali bervariasi.

2.10.4 Penentuan level faktor

Level faktor adalah level nilai atau atribut yang melekat pada sebuah faktor dengan jumlah minimal dua buah. Menentukan jumlah level dan nilai tiap

level tergantung pada pengetahuan terhadap proses atau produk. Jika proses atau produk yang diselidiki merupakan hal baru maka disarankan untuk menggunakan tiga buah level untuk mengalisa ketidaklinieran variabel tersebut. Jika efek variabel tertentu diketahui benar maka dua buah level faktor dianggap cukup untuk menghasilkan informasi yang dibutuhkan dari analisis hasil eksperimen. Tiga buah level faktor dapat dipilih apabila peneliti mengalami kesulitan dalam menentukan jumlah level karena tiga level mungkin memberikan cukup informasi. Penentuan jumlah level juga banyak dipengaruhi oleh pertimbangan biaya dan besarnya peningkatan cakupan eksperimen dengan meningkatkan level dari dua menjadi tiga. Dua buah level faktor dipilih jika variabel memiliki sifat fungsi linier (garis lurus), tiga level jika bersifat fungsi kuadrat (kurva) dan empat level jika mengikuti fungsi kubik (juga berbentuk kurva).

Jarak level faktor perlu menjadi sebuah bahan pertimbangan. Penentuan jarak antar level tergantung dari tujuan eksperimennya, apakah untuk mengetahui tanggapan pada jangkauan luas atau menala guna memperoleh kondisi optimal. Jika jarak level faktor yang dipilih terlalu sempit atau terlalu lebar kemungkinan efek faktor tidak terlihat signifikan sehingga pengetahuan teknis diperlukan dalam memilih jarak level faktor. Pertimbangan lain yang dapat muncul dalam pemilihan adalah kemungkinan untuk melakukan berbagai kombinasi pengaturan eksperimen dan tingkat keamanan bila hasil eksperimen diterapkan kondisi sebenarnya (Belavendram, 1995).

2.10.5 Grafik linier

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

Gambar 2.6 menunjukkan grafik linier $L_9(3^4)$, bentuk grafik tersebut mirip dengan $L_4(2^3)$ yaitu ada satu bentuk linier dan skema pemetaan serta hanya ada satu interaksi yang dapat digabungkan. Satu perbedaan di antara dua grafik adalah interaksi $L_9(3^4)$ menggunakan dua kolom dan bukan satu kolom dikarenakan derajat kebebasan yang diperlukan (Soejanto, 2009).



Gambar 2.6 Grafik linier $L_9(3^4)$
(Soejanto, 2009)

2.10.6 Penentuan dan pemilihan *Orthogonal Array*

2.10.6.1 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

$$\begin{aligned} V_A &= (\text{jumlah level faktor A}) - 1 \\ &= k_A - 1 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} V_B &= (\text{jumlah level faktor B}) - 1 \\ &= k_B - 1 \end{aligned} \tag{12}$$

Untuk interaksi, misal interaksi A dan B

$$V_{AxB} = (k_A - 1)(k_B - 1) \tag{13}$$

Nilai derajat bebas total

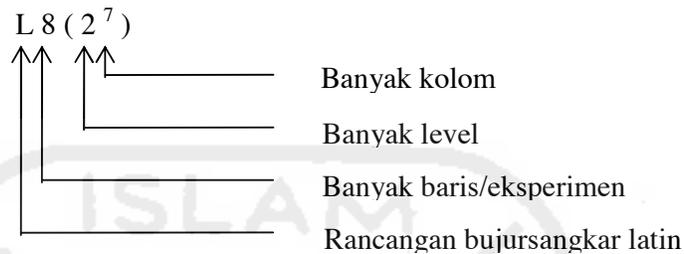
$$(k_A - 1) + (k_B - 1) + (k_A - 1)(k_B - 1) \tag{14}$$

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

2.10.6.2 *Orthogonal Array*

Matrik orthogonal atau *orthogonal array* terdiri dari kolom-kolom *orthogonal*. Yaitu untuk setiap pasang kolom, semua kondisi performansi muncul dalam jumlah yang sama. Dalam matrik orthogonal, kolom menyatakan faktor-faktor yang dipelajari, baris mewakili eksperimen individual, jumlah baris menyatakan banyaknya eksperimen yang harus dilakukan, dimana jumlah baris

minimal sama dengan *degree of freedom* dan isi dari matrik orthogonal menyatakan level atau taraf dari faktor-faktor yang dipelajari.



Gambar 2.7 Notasi *Orthogonal Array*

a. Notasi L

Notasi L menyatakan informasi mengenai *Orthogonal Array*.

b. Nomor Baris

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

c. Nomor Level

Menyatakan jumlah level faktor.

d. Nomor Kolom

Menyatakan jumlah faktor yang diamati dalam *Orthogonal Array*

Pemilihan matrik orthogonal yang dipakai bergantung pada derajat bebas atau *degree of freedom* yang dipelajari, level faktor yang dipelajari, resolusi dan biaya (Belavendram, 1995). Dalam memilih *array orthogonal* yang sesuai untuk suatu eksperimen tertentu disyaratkan agar $V_{OA} \geq V_{fl}$, dengan V_{fl} : derajat bebas level faktor (Belavendram, 1995). Derajat bebas *array orthogonal* (V_{OA}) selalu kurang 1 dari banyaknya eksperimen.

$$V_{OA} = n_{OA} - 1$$

Dengan n_{OA} adalah banyaknya baris/eksperimen. Sedangkan derajat bebas suatu faktor (V_{fl}) adalah satu kurangnya dari jumlah level faktor tersebut.

$$V_{fl} = n_{fl} - 1$$

dengan n_{fl} adalah banyaknya level.

Tabel 2.1 Orthogonal Array Standar

2 level	3 level	4 level	5 level	Level gabungan
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^5)$	$L_{25}(5^6)$	$L_{18}(2^1 \times 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$		$L_{32}(2^1 \times 4^9)$
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(2^{40})$			$L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$				$L_{36}(2^3 \times 3^{13})$
$L_{32}(2^{31})$				$L_{54}(2^1 \times 3^{25})$
$L_{64}(2^{63})$				$L_{50}(2^1 \times 5^{11})$

Tabel 2.2. Matrik *Orthogonal Array* $L_9 (3^4)$

Trial NO	Column Number			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2.11 Uji Persyaratan Analisis Data

2.11.1 Uji normalitas

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 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (15)$$

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 teramati dan frekuensi harapan bagi sel ke- i (Walpole et al, 1997).

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 khi-kuadratnya.

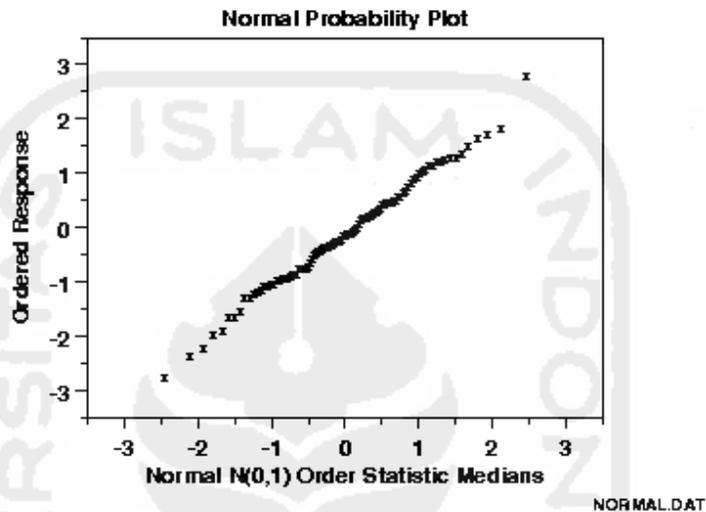
Untuk taraf nyata sebesar α , nilai kritisnya $\chi^2(\alpha)(dk)$ dapat diperoleh pada tabel distribusi khi-kuadrat, dengan demikian wilayah kritisnya adalah $\chi^2 \geq \chi^2(\alpha)(dk)$ (Sudjana, 1989).

Kriteria keputusan ini tidak dapat digunakan apabila ada frekuensi harapan yang nilainya kurang dari 5. Persyaratan ini mengakibatkan adanya penggabungan sel-sel yang berdekatan, sehingga mengakibatkan berkurangnya derajat bebas. Banyaknya derajat bebas dalam uji kebaikan-suai yang didasarkan pada sebaran khi-kuadrat, sama dengan banyaknya sel (kelas) dalam percobaan yang bersangkutan dikurangi dengan banyaknya besaran yang diperoleh dari data pengamatan (contoh) yang digunakan dalam perhitungan frekuensi harapannya (Walpole et al, 1997).

Banyaknya derajat bebas (dk) bagi uji kenormalan adalah $dk = k - 3$, karena ada tiga besaran yaitu frekuensi total, rata-rata dan simpangan baku yang diperlukan untuk menghitung frekuensi-frekuensi harapannya, dan k adalah banyaknya kelas interval.

Normal probability plot merupakan sebuah teknik grafik yang dapat digunakan untuk menilai apakah data mengikuti distribusi normal. Grafik ini menggunakan Data digambarkan dan dibandingkan terhadap distribusi normal teoritis dengan cara tertentu sehingga titik-titiknya membentuk sebuah garis lurus. Penyimpangan data dari garis lurus ini mengindikasikan adanya penyimpangan dari distribusi normal. Jika titik-titik data pada grafik jenis ini membentuk garis lurus maka mengindikasikan bahwa distribusi normal merupakan asumsi model

yang tepat untuk kelompok data uji. *Normal probability plot* dibentuk dari sumbu vertikal berupa *ordered response values* dan sumbu horizontal berupa *normal order statistic medians* (Chambers et al., 1983)



Gambar 2.8 *Normal probability plot*
(Chambers et al., 1983)

Luaran uji normalitas data Minitab menghasilkan bentuk grafik berupa *normal probability plot* disertai data hasil statistik. Jika data cukup normal, titik-titik data akan berada didekat garis referensi diagonal. Nilai P yang merupakan hasil statistik digunakan menentukan apakah kelompok data mengikuti distribusi normal. Untuk tingkat signifikansi 0,05, jika nilai P dari data lebih besar 0,05 maka terdapat cukup bukti data mengikuti distribusi normal (Mikel et al., 2011).

2.11.2 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

$$\chi^2 = (\ln 10) \left\{ B - \sum (n_i - 1) \log s_i^2 \right\} \quad (16)$$

Dimana:

$$\ln 10 = 2,306$$

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

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

Dengan taraf nyata α , hipotesis H_0 ditolak jika $x^2_{hitung} \geq x^2_{(1-\alpha)(dk)}$, dimana $x^2_{(1-\alpha)(dk)}$ didapat dari tabel Chi-Kuadrat dengan peluang $(1-\alpha)$ dan $dk = (k-1)$. Sebaliknya jika didapat hasil $x^2_{hitung} \leq x^2_{tabel}$ dengan $x^2_{tabel} = x^2_{(1-\alpha)(k-1)}$ maka data homogen (Sudjana, 1992).

Summary plot dalam Minitab menunjukkan interval-interval pada uji homogenitas variansi. Tipe interval yang ditampilkan tergantung dari apakah penulis memilih uji dan interval kepercayaan berdasarkan distribusi normal. Jika tidak memilih uji dan interval kepercayaan berdasarkan distribusi normal maka *summary plot* menampilkan perbandingan interval-interval berdasar metode *multiple comparisons intervals*. Jika dalam *summary plot* dua buah interval tidak saling *overlap* maka perbedaan standar deviasi antara keduanya signifikan secara statistik sehingga terdapat perbedaan variansi antar kelompok data uji.

Sebaliknya jika memilih tipe uji dan interval kepercayaan berdasarkan distribusi normal maka untuk dua kelompok data minitab melakukan uji F sedangkan pada tiga kelompok data atau lebih minitab melakukan uji Bartlett. Untuk kedua jenis uji ini *plot* juga menampilkan *Bonferroni confidence intervals*, namun tidak dapat digunakan menentukan perbedaan antar kelompok data. Nilai P harus digunakan untuk menentukan apakah perbedaan standar deviasi antar kelompok signifikan secara statistik (Minitab, 2015).

2.12 Analisis Variansi (ANOVA)

Analisis ragam atau variansi adalah suatu metode untuk menguraikan keragaman total (variansi total) dari data-data yang kita peroleh menjadi komponen-komponen pembentuk keragaman total tersebut sehingga dapat diukur sebagai sumber keragaman (variansi), pengaruh-pengaruh variabel dependen dan kontribusi setiap faktor terhadap total variansi (Sudjana, 2002).

Langkah-langkah perhitungan dalam analisis variansi multifaktor adalah sebagai berikut (Ross, 1988) :

1. Menghitung harga-harga *Sum of Square* (SS) atau jumlah kuadrat (JK)
 - a. Total *Sum of Square* (SST) atau jumlah kuadrat total

$$\bar{T} = \frac{T}{N} = \bar{y} \quad \text{dan} \quad T = \sum_{i=1}^N y_i \quad (17)$$

Persamaan diatas dapat dirumuskan kembali menjadi :

$$SST = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (18)$$

Keterangan:

y_i = nilai respon (data pengamatan) ke

$\bar{T} = \bar{y}$ = rata-rata respon

N = jumlah pengamatan

b. *Sum of Squares Due to the Mean* (SSm) atau jumlah kuadrat rata-rata

$$SSm = n \times \bar{y}^2 \quad (19)$$

Keterangan:

Sm = Jumlah kuadrat rata-rata

n = jumlah pengamatan

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

c. *Sum of Square* atau jumlah kuadrat untuk suatu faktor, misal faktor A

$$SSA = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) - \frac{T^2}{N} \right] \quad (20)$$

Keterangan:

SSA = *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 :

$$SS = \sum (a(m_i - m)^2) \quad (21)$$

Keterangan:

SS = *Sum of Square* untuk setiap faktor

a = Jumlah munculnya tiap level faktor dalam suatu kolom matrik orthogonal

m_i = rata-rata efek tiap level faktor

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

2. Menghitung *degree of freedom* (Vf) atau derajat bebas (db)

a. *Degree of freedom* total (Vf_T) dirumuskan dengan

$$Vf_T = N - 1 \quad (22)$$

atau

$$Vf_T = Vf_{faktor} + Vf_{interaksi} + Vf_{error} \quad (23)$$

b. *Degree of freedom* suatu faktor dirumuskan dengan

$$Vf = k - 1 \quad (24)$$

c. *Degree of freedom error* (Vf_e) dirumuskan dengan

$$Vf_e = Vf_T - Vf_{faktor} - Vf_{interaksi faktor} \quad (25)$$

3. Menghitung *sum of squares due to error* (Se) atau jumlah kuadrat karena *error*

$$SSe = SST - SSm - SSA - SSB - SSC - SSD \quad (26)$$

4. Menghitung *mean of square* (Mq) suatu faktor atau interaksi faktor

$$Mq = \frac{SS}{df} \quad (27)$$

5. Menghitung rasio F suatu faktor

$$F = \frac{Mq}{Mq_e} \quad (28)$$

6. Menghitung *pure of square* (SS') suatu faktor

$$SS' = SS - (df \times Mqe) \quad (29)$$

7. Menghitung persen kontribusi (P) suatu faktor

$$P = \left(\frac{SS'}{SS_T} \times 100\% \right) \quad (30)$$

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, $F_{hitung} < F(\alpha, v_1; v_2)$

Ho ditolak apabila, $F_{hitung} > F(\alpha, v_1; v_2)$

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

$$F = \frac{\text{Variance between mean}}{\text{Variance within group}} \quad (31)$$

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

Tabel 2.3 Anova satu arah

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

Kemudian menarik kesimpulan, apakah H_0 diterima atau ditolak dengan membandingkan F hitung dengan F tabel .

2.13 Rasio Signal Terhadap Noise (S/N Ratio)

S/N ratio adalah logaritma dari suatu fungsi kerugian kuadratik dan digunakan untuk mengevaluasi kualitas suatu produk. Ada beberapa jenis S/N rasio, yaitu :

1. *Smaller –the-Better* (STB)

Karakteristik kualitas dimana semakin rendah nilainya, maka kualitas semakin baik. Meskipun demikian, dalam penentuan level faktor optimal tetap dipilih nilai S/N Ratio yang terbesar (Belavendram, 1995). Nilai S/N untuk jenis karakteristik STB adalah :

$$S/N_{STB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^2 \right] \quad (32)$$

Keterangan :

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

y_i = nilai respon dari cuplikan ke – i untuk jenis eksperimen tertentu

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

Karakteristik kualitas dimana semakin besar nilainya, maka kualitas semakin baik. Nilai S/N untuk jenis karakteristik LTB adalah :

$$S/N_{LTB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (33)$$

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.

Nilai S/N untuk jenis karakteristik NTB adalah :

$$S/N_{NTB} = 10 \log \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \quad (34)$$

Dimana:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2$$

Keterangan:

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

y_i = nilai respon dari cuplikan ke – i untuk jenis eksperimen tertentu

2.14 Perhitungan Efek Tiap Faktor

Perhitungan efek tiap faktor, dalam hal ini faktor kendali dilakukan dengan menggunakan rumus :

$$\text{Efek faktor} = \frac{1}{a} \left(\sum \eta_0 \right) \quad (35)$$

Keterangan :

0 = nomor eksperimen yang mempunyai level sama

a = jumlah munculnya tiap level faktor dalam suatu kolom matriks orthogonal

η = nilai SNR yang digunakan

Setelah semua efek tiap faktor dihitung, kemudian dicari perbedaan maksimum dari tiap – tiap faktor dan ditentukan ranking dari tiap-tiap faktor secara berurutan mulai dari faktor yang mempunyai perbedaan paling besar.

2.15 Uji Prediksi Regresi Linier

Uji prediksi dilakukan dengan 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.

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 :

$$\hat{y} = a + bX \quad (36)$$

Keterangan:

\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 :

$$b = \frac{n(\sum_{i=1}^n X_i Y_i) - (\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n(\sum_{i=1}^n X_i^2) - (\sum_{i=1}^n X_i)} \quad (37)$$

$$a = \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i) - b(\sum_{i=1}^n X_i)}{n} \quad (38)$$

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:

$$\hat{y} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (39)$$

Keterangan:

\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

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

Menurut Usman dan Akbar, 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 pertambahan. 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

$$\sum y = an + b_1 \sum X_1 + b_2 \sum X_2 + \dots + b_n \sum X_n \quad (40)$$

$$\sum X_1Y = a \sum X_1 + b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1X_2 + \dots + b_n \sum X_1X_n \quad (41)$$

$$\sum X_2 Y = a \sum X_2 + b_1 \sum X_2 X_1 + b_2 \sum X_2^2 + \dots + b_n \sum X_2 X_n \quad (42)$$

$$\sum X_n Y = a \sum X_n + b_1 \sum X_n X_1 + b_2 \sum X_n X_2 + \dots + b_n \sum X_n^2 \quad (43)$$

Eliminasi Gaus

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 & \dots & \sum X_n \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 & \dots & \sum X_1 X_n \\ \sum X_2 & \sum X_2 X_1 & \sum X_2^2 & \dots & \sum X_2 X_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum X_n & \sum X_1 X_n & \sum X_2 X_n & \dots & \sum X_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum Y \cdot X_1 \\ \sum Y \cdot X_2 \\ \vdots \\ \sum Y \cdot X_n \end{bmatrix} \quad (44)$$

Determinan

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 \\ \sum X_2 & \sum X_2 X_1 & \sum X_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum Y \cdot X_1 \\ \sum Y \cdot X_2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$a = \frac{a^{-1}}{R^{-1}}, b_1 = \frac{b_1^{-1}}{R^{-1}}, b_2 = \frac{b_2^{-1}}{R^{-1}} \quad (46)$$

Keterangan:

R^{-1} = determinan matriks R

b_1^{-1} = determinan b_1

b_2^{-1} = determinan b_2

2.16 Eksperimen Konfirmasi

Tujuan eksperimen konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diperoleh selama tahap analisa. Hal ini perlu dilakukan bila digunakan percobaan dengan resolusi rendah dan berbentuk faktorial fraksional. Ketika eksperimen yang digunakan berbentuk faktorial-fraksional dan beberapa faktor memiliki kontribusi terhadap variasi, terdapat kemungkinan bahwa kombinasi terbaik dari faktor dan level tidak nampak pada kombinasi pengujian *orthogonal array*. Eksperimen konfirmasi juga bertujuan melakukan pengujian kombinasi faktor dan level ini.

Menurut Soejanto, 2009 langkah-langkah pelaksanaan eksperimen konfirmasi adalah sebagai berikut:

1. Menentukan kombinasi terbaik dari level faktor dan interaksi yang signifikan.
2. Menentukan level dari faktor yang tidak signifikan.
3. Menghitung estimasi rata-rata kombinasi level faktor dan interaksi signifikan.
4. Menghitung estimasi deviasi standart kombinasi faktor-faktor dan interaksi-interaksi yang signifikan.
5. Menentukan ukuran sampel eksperimen konfirmasi.
6. Menghitung nilai interval kepercayaan.
7. Menghitung interval kepercayaan bagi nilai rata-rata sebenarnya di sekitar estimasi nilai rata-rata.
8. Melakukan pengujian.

9. Membandingkan hasil rata-rata pengujian konfirmasi dengan interval kepercayaan dari rata-rata sebenarnya.

10. Menentukan tindakan berikutnya.

2.16.1 Interval kepercayaan

Interval kepercayaan merupakan nilai maksimum dan minimum dimana di harapkan nilai rata-rata sebenarnya akan tercakup dengan beberapa persentase kepercayaan tertentu. Ketika menyatakan sebuah nilai kepercayaan untuk sesuatu interval kepercayaan, pelaku percobaan menyatakan bahwa nilai rata-rata sebenarnya akan jatuh di dalam batas-batas yang ditetapkan (Belavendram, 1995).

2.16.2 Interval kepercayaan untuk level faktor

Berikut ini rumus perhitungan interval kepercayaan untuk level faktor:

$$CI = \sqrt{F_{\alpha, V1, V2} \times Ve \times \left(\frac{1}{n}\right)} \quad (47)$$

Keterangan:

$F_{\alpha, V1, V2}$ = Nilai F -ratio dari table

α = Resiko, Level kepercayaan = 1 – resiko

$V1$ = Derajat kebebasan untuk pembilang yang berhubungan dengan suatu rata-rata dan selalu sama dengan 1 untuk suatu interval kepercayaan.

$V2$ = Derajat kebebasan untuk penyebut yang berhubungan dengan derajat kebebasan dari variansi *pooled error*

Ve = Variansi *pooled error*

N = Jumlah pengamatan yang digunakan untuk menghitung rata-rata (mean).

Sehingga, jika rata-rata sesungguhnya adalah $\mu \bar{A}_1$ maka:

$$\mu \bar{A}_1 = \bar{A}_1 \pm CI \quad (48)$$

$$\bar{A}_1 - CI \leq \mu \bar{A}_1 \leq \bar{A}_1 + CI \quad (49)$$

2.16.3 Interval kepercayaan untuk perkiraan rata-rata

Perhitungan interval kepercayaan untuk perkiraan rata-rata proses optimum adalah sebagai berikut:

$$CI = \sqrt{F_{\alpha, v_1, v_2} \times Ve \times \left(\frac{1}{n_{eff}} \right)} \quad (50)$$

di mana n_{eff} adalah jumlah pengamatan efektif,

$$n_{eff} = \frac{\text{Jumlah total eksperimen}}{\text{Jumlah derajat kebebasan dalam perkiraan rata - rata}} \quad (51)$$

Angka penyebut dalam persamaan di atas harus mencakup derajat kebebasan untuk keseluruhan rata-rata. Nilai n_{eff} tergantung pada jumlah derajat kebebasan yang digunakan untuk menghitung rata-rata taksiran proses optimum dan tidak tergantung pada level faktor yang digunakan. Semua faktor dan interaksi yang digunakan untuk menghitung rata-rata yang diperkirakan haruslah tercakup dalam derajat kebebasan untuk menghitung n_{eff} . Interval kepercayaan untuk rata-rata proses optimum ini adalah sebagai berikut:

$$\mu_{Prediksi} - CI \leq \mu_{Prediksi} \leq \mu_{Prediksi} + CI \quad (52)$$

2.16.4 Interval kepercayaan untuk eksperimen konfirmasi

Eksperimen konfirmasi digunakan untuk mengkonfirmasi bahwa rata-rata yang ditaksir untuk faktor dan level yang telah dipilih dari eksperimen adalah valid. Rumusnya adalah sebagai berikut:

$$CI = \sqrt{F_{\alpha, V_1, V_2} \times Ve \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (53)$$

Nilai r adalah ukuran sampel (jumlah replikasi) untuk eksperimen konfirmasi (r tidak sama dengan 0). Jika r mendekati jumlah yang sangat besar, maka $1/r$ mendekati nol dan rumusnya berkurang menjadi interval kepercayaan yang berada di sekitar mean yang diperkirakan. Ketika r menjadi semakin kecil $1/r$ menjadi lebih besar dan interval kepercayaan meningkat. Tentu saja r tidak bisa kurang dari 1

Interval kepercayaan adalah sebagai berikut:

$$\mu_{Konfirmasi} - CI \leq \mu_{Konfirmasi} \leq \mu_{Konfirmasi} + CI \quad (54)$$

2.17 Taguchi Multiresponse MRSN (*Multi Respon Signal to Noise*)

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

1. Menghitung *quality loss* untuk setiap trial. Untuk karakteristik kualitas:

a. *Larger the better*

$$L_{ij} = k \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \frac{1}{y^2_{ijk}} \quad (55)$$

b. *Nominal the best*

$$L_{ij} = k \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} (y_{ijk} - m)^2 \quad (56)$$

c. *Smaller the best*

$$L_{ij} = k \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y^2_{ijk} \quad (57)$$

Keterangan :

L_{ij} = *quality loss* untuk respon ke-i, trial ke-j

Y_{ijk} = data untuk respon ke-i, trial ke-j, replikasi ke-k

n_i = replikasi untuk respon ke-i

k = koefisien dari *quality loss*

m = nilai target

2. Menentukan *Multi Respon Signal to Noise* (MRSN) Ratio.

a. Menentukan *quality loss* maksimum untuk tiap respon.

b. Normalisasi *quality loss* tiap eksperimen.

$$C_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i} \quad (58)$$

Keterangan:

C_{ij} = *normalized quality loss* untuk respon ke-i, pada trial ke-j

$$L_{ij} = \max \{L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ij}\}$$

c. Menghitung *total normalized quality loss* (TNQL) setiap eksperimen:

$$TNQL_i = \sum_{i=1}^m w_i x C_{ij} \quad (59)$$

Keterangan :

w_i = bobot dari normalisasi respon ke-i

d. Menghitung MRSN ratio setiap eksperimen.

$$MRSN_j = -10 \log(TNQL_j) \quad (60)$$

3. Menentukan kombinasi level faktor yang optimal berdasarkan nilai MRSN terbesar. Tahapannya :

- a. Membuat tabel respon dan grafik respon dari MRSN.
- b. Menentukan faktor kontrol yang memiliki efek yang signifikan terhadap MRSN.
- c. Menentukan level optimal dari faktor kontrol berdasarkan nilai MRSN terbesar.

4. Melakukan eksperimen konfirmasi.

Hasil eksperimen konfirmasi menentukan apakah level kontrol faktor optimal yang diperoleh bisa diperluas pada skala industri.

2.18 Uji Beda

Menurut Supranto, 2001, dalam praktek seringkali ingin diketahui apakah ada perbedaan yang berarti dari dua rata-rata.

Perumusan hipotesanya adalah sebagai berikut :

Ho : $\mu_1 - \mu_2 = 0$ atau Ho = $\mu_1 = \mu_2$ (Tak ada perbedaan, atau sama)

(1) Ha : $\mu_1 - \mu_2 > 0$ (ada penurunan : $\mu_1 > \mu_2$)

(2) Ha : $\mu_1 - \mu_2 < 0$ (ada kenaikan: $\mu_1 < \mu_2$)

(3) Ha : $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ (μ_1 tidak sama dengan μ_2 atau μ_1 berbeda dari μ_2).

a) Bila $n > 30$ (sampel besar)

$$Z_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} \quad (61)$$

$$\sigma_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \quad (62)$$

Dimana apabila σ_1^2 dan σ_2^2 tak diketahui diestimasi dengan :

$$S_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} \quad (63)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum (x_{i1} - \bar{X}_1)^2 \quad (64)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum (x_{i2} - \bar{X}_2)^2 \quad (65)$$

b) Bila $n \leq 30$ (sampel kecil)

$$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (66)$$

t_0 mempunyai distribusi t dengan derajat kebebasan sebesar $n_1 + n_2 - 2$.

Cara pengujiannya adalah $Z_0(t_0)$ dibandingkan dengan $Z_{\alpha}, Z_{\alpha/2}, -Z_{\alpha/2}(t_{\alpha}, t_{\alpha/2}, -t_{\alpha/2})$.

