

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Pustaka yang ditinjau adalah hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pengukuran COPQ, implementasi *Six Sigma* DMAIC, *Failure Mode Effect Analysis* (FMEA), dan *Design of Experiment* (DOE).

2.1.1. *Cost of Poor Quality*

COPQ merupakan elemen biaya kualitas yang timbul selama proses produksi akibat ketidaksesuaian produk terhadap spesifikasi yang ditetapkan oleh konsumen. Berikut adalah penelitian terdahulu mengenai pengukuran biaya kualitas yang melibatkan COPQ.

Pelawi (2011) melakukan pengukuran biaya kualitas pada PT. Senang Kharisma Textile untuk menentukan biaya kualitas yang optimal. Biaya kualitas yang diukur pada penelitian Pelawi adalah biaya pencegahan, penilaian, kegagalan interna dan kegagalan eksternal. Biaya kegagalan internal terdiri dari sisa dan pengerjaan kembali, sedangkan biaya kegagalan eksternal terdiri dari keluhan pelanggan, garansi dan biaya reparasi. Penelitian serupa dilakukan oleh Mayangpuspa (2009) untuk menganalisis biaya mutu pada CV. Karya Hidup Sentosa untuk mengetahui apakah biayanya sudah efektif atau belum. Biaya kegagalan internal terdiri dari sisa *scrap*, pengerjaan kembali, *downtime* karena kerusakan, inspeksi, pengujian kembali, dan perubahan desain. Biaya kegagalan eksternal terdiri dari penjualan yang hilang karena kinerja yang buruk, pengembalian dan cadangan karena mutu yang buruk, jaminan, reparasi dan keluhan pelanggan. Hasil penelitian ini berupa rekomendasi apakah perlu dilaksanakan perbaikan atau tidak.

Usman (2011) menganalisis pengaruh biaya kualitas terhadap kinerja *balanced scorecard*. Biaya kualitas diidentifikasi melalui aktivitas-aktivitas pada perusahaan, kemudian diklasifikasikan menjadi biaya non-kualitas dan biaya kualitas. Biaya kualitas yang dikategorikan ke dalam COPQ adalah bahan baku *reject*, tenaga kerja karena *reject*, listrik karena *reject*, dan *downtime* mesin.

Anggriani dan Goestaman (2013) melakukan penelitian untuk mengetahui peranan analisis biaya kualitas untuk meningkatkan kualitas produk pada PT.X di Surabaya. Biaya kualitas diklasifikasikan menjadi *direct* dan *indirect cost quality*.

COPQ terdiri dari sisa bahan produksi, pengerjaan ulang, biaya komplain, klaim garansi dan kerugian tentang pandangan buruk dari pelanggan.

Bourne dkk (2012) menganalisis pengaruh biaya kualitas terhadap *top management*. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa pihak manajemen harus menginvestasikan biaya *prevention* yang cukup untuk mereduksi total biaya kualitas.

Teli dkk (2013) menganalisis COPQ pada industri otomotif. *Internal failure costs* meliputi *redesign, downtime, delay, scrap, rework*, re-inspeksi, *retesting* dan *downgrading*. *External failure costs* terdiri dari komplain *customer*, barang yang dikembalikan, penurunan penjualan dan perbaikan produk.

Rasamanie dan Kanapathy (2011) melakukan penelitian untuk mengetahui kesulitan dan keuntungan dari pengimplementasian biaya kualitas melalui metode survei. Kesulitan yang terjadi adalah kurangnya koordinasi antar departemen dan sulit untuk mendapatkan data aktual. Keuntungan yang diperoleh adalah meningkatkan kualitas produk dan menurunkan tingkat kegagalan yang terjadi.

Penelitian lainnya adalah penelitian untuk mengetahui besarnya COPQ yang terjadi pada industri manufaktur. Menurut penelitian Rust (1995), COPQ berkisar antara 20% sampai 30% dari total pendapatan. Sedangkan *cost of good quality* (COGQ) berkisar 3% sampai 4% dari total pendapatan.

2.1.2. Six Sigma DMAIC

Six Sigma DMAIC merupakan metodologi penyelesaian masalah kualitas dengan memperhatikan kinerja yang dilihat dalam nilai *Sigma*. Berikut adalah penelitian terdahulu yang berkaitan dengan metode *Six Sigma* DMAIC.

Dwi (2008) menganalisis perencanaan kualitas *plywood* dengan pendekatan konsep DMAIC pada Langgeng Plywood, Malang. Penelitian Dwi bertujuan untuk memberikan solusi perbaikan pada Langgeng Plywood sehingga kualitas *plywood*-nya meningkat. Hasil penelitian masih berupa saran perbaikan yang belum diimplementasikan. Penelitian serupa lainnya dilakukan oleh Sundana (2004) yang menganalisis cacat *plywood* pada PT. Surya Timur. Metode yang digunakan adalah *Six Sigma*. Penelitian ini berfokus pada 1 jenis *plywood* yaitu *plywood* berukuran 2,4 mm. Cacat pada *plywood* yang diperbaiki adalah cacat yang terbanyak. Tahap analisis dilakukan dengan *brainstorming* penyebab dan

jajak pendapat pekerja. Menurut hasil implementasi perbaikan, didapatkan penurunan COPQ sebesar Rp15.158.000,00.

Penelitian dengan metode *Six Sigma* dilakukan oleh Yudanto (2010) pada PT.GE Lighting Indonesia. Penelitian ini dibatasi pada produk tertentu dan departemen tertentu. Hasil penelitian berupa usulan perbaikan agar produk cacat berkurang.

Sihombing dan Vasu (2011) menganalisis kecacatan pada proses penekanan di salah satu industri *thermoplastic* di Malaysia. Kecacatan terjadi karena variasi proses akibat temperatur, waktu penekanan, dan jarak tekan. Metodologi *Six Sigma* DMAIC diterapkan untuk meningkatkan kualitas pada injeksi 30 ton plastik. Eksperimen dilakukan dengan mesin sebagai faktor dan didapatkan usulan perbaikan yang optimal dan didapatkan penurunan cacat yang signifikan. Usulan yang diberikan adalah *setting* parameter mesin yang optimal.

Polomarto dkk (2013) melakukan menganalisis solusi untuk mengurangi kecacatan produk karton makan duplex pada UD. Wing On Surabaya. Alat-alat pengendalian kualitas yang digunakan dalam penelitian ini adalah *checksheet*, diagram pareto, peta kendali (*p-chart*), diagram sebab akibat, serta FMEA. Hasil penelitian menggunakan alat kendali kualitas menunjukkan bahwa produksi karton masih diluar batas kendali sehingga perlu dilakukan beberapa tindakan lanjutan, seperti desain terhadap *checksheet* baru dengan penambahan entitas agar pencatatan lebih efektif dan efisien.

Prashar (2014) melakukan pengimplementasian *Six Sigma* DMAIC pada perusahaan pembuat kipas pendingin untuk menurunkan COPQ. Pada fase *Define* digunakan PPI, SIPOC, dan CTQ *Tree*. Pada fase *measure* dibuatkan peta proses, *sampling plan*, dan analisis kapabilitas proses. *Cause-effect diagram* digunakan pada fase *analyze* untuk mencari akar permasalahan. PFMEA digunakan untuk meningkatkan kemampuan proses, dan *control* dilakukan dengan *control chart*. Setelah pengimplementasian, terjadi penurunan COPQ untuk kipas pendingin dari 9 % sampai 0 %.

Hariri dkk (2013) menganalisis mengenai kecacatan susu *Greenfields* setelah proses *filling*. Metode yang digunakan adalah *Six Sigma* DMAIC. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui faktor penyebab cacat dan memberikan usulan perbaikan berdasarkan hasil FMEA. Kesimpulan dari penelitian ini adalah cacat produk yang disebabkan oleh mesin, kecerobohan pekerja dan kurangnya

pemeliharaan. Usulan perbaikan yang diberikan adalah pemeliharaan teratur untuk mencegah terjadinya cacat.

Kumar dan Sosnoki (2009) menginvestigasi strategi pengurangan cacat produk pada rantai produksi. Metode yang digunakan adalah *Six Sigma* DMAIC dengan *tools* berupa *brainstorming*, *process mapping*, *cause-effect diagram*, histogram dan *control chart*. Setelah pengimplementasian, terdapat penghematan sebesar \$10,000 per tahun. Terdapat kesimpulan bahwa *Six Sigma* sangat efektif untuk meningkatkan kualitas, produktivitas, dan menurunkan biaya produksi.

Mandal (2012) melakukan penelitian untuk membuktikan kegunaan implementasi DMAIC dalam mencapai tujuan bisnis. Ukuran performansi yang digunakan adalah kemudahan dalam pengawasan dan pengetahuan yang didapatkan dari proses. Pendekatan yang digunakan untuk analisis adalah menggunakan DOE. Hasil analisis menunjukkan bahwa perlu diterapkan analisis strategi berdasarkan inovasi dan prioritas untuk memperbaiki dan meningkatkan ukuran performansi.

Almeida dkk (2013) menganalisis kualitas kayu pinus sebagai bahan baku *plywood*. Metode yang digunakan untuk menganalisis adalah ANOVA, melihat rata-rata dan homogenitas sampel. Hasil penelitian membuktikan bahwa kualitas kayu pinus yang digunakan sudah tergolong baik.

2.1.3. Failure Mode Effect Analysis

FMEA merupakan metode untuk mengidentifikasi, mengevaluasi penyebab kegagalan dan memprioritaskan *improvement* pada resiko kegagalan tertinggi.

Kumar dan Chaturvedi (2011) memprioritaskan *maintenance* preventif pada industri perkakas dengan mengevaluasi resiko kegagalan dengan FMEA. Pada tahap pengumpulan data untuk kalkulasi RPN, terdapat hambatan karena tidak tersedianya data historis atau lapangan. Oleh karena itu, para ahli dalam industri tersebut dilibatkan sebagai dasar penilaian terhadap resiko kegagalan yang terjadi. Hasil penelitian berupa pengawasan prediktif dan *maintenance* periodik sebelum terjadinya kegagalan.

Estorilio dan Posso (2010) mengevaluasi FMEA yang digunakan oleh 10 otomotif di Brazil dan memberikan solusi untuk pembuatan FMEA yang baru didasarkan pada data. Pengumpulan data dilakukan dengan menyebar kuesioner kepada 7 *supplier* industri otomotif untuk menilai secara kualitatif. Penilaian *supplier* akan

menjadi prioritas industri otomotif untuk melakukan *improvement* dari kegagalan yang telah dinilai.

2.1.4. Design of Experiment

DOE adalah serangkaian percobaan terstruktur yang dilakukan dengan tujuan menggali informasi dan mempelajari efek suatu peristiwa.

Jou, *et al* (2014) mengintegrasikan metode Taguchi dan *Response Surface Method* (RSM) untuk mengoptimasi parameter proses *injection molding*. Eksperimen dimulai dengan menentukan variabel eksperimen dan level faktor. *Layout* desain dipilih kemudian eksperimen dijalankan. Data diolah dengan menghitung *S/N ratio* dengan kriteria *smaller is better*. ANOVA dilakukan untuk mencari apakah faktor memberikan efek signifikan terhadap karakteristik kualitas atau tidak. Faktor yang tidak memberikan pengaruh signifikan akan diabaikan. Persen kontribusi kemudian dihitung, apabila kurang dari 15 %, maka faktor tersebut dapat dihilangkan dari eksperimen. Hasil analisis didapatkan faktor signifikan dan digunakan *Central Composite Design* (CCD) dalam RSM. Pemodelan dengan RSM dilakukan uji *lack-of-fit* dengan model orde 2 untuk cek kesesuaian model. Plot permukaan dan kontur dianalisis kemudian menentukan *setting* optimal.

Chomsamutr dan Jongpratsithporn (2012) melakukan eksperimen dengan metode Taguchi dan RSM untuk mengoptimalkan umur pakai alat potong. Eksperimen dimulai dengan menentukan karakteristik kualitas dan faktor beserta levelnya. *Orthogonal array* dipilih dan eksperimen dijalankan berdasarkan *orthogonal array*. *S/N ratio* dihitung dan ANOVA dilakukan. Pemodelan dengan RSM dilakukan setelah mengetahui faktor yang signifikan dengan ANOVA. Pencarian level optimal untuk parameter proses dilakukan *Response Optimizer*.

Hadiyat dan Wahyudi (2013) mengatakan bahwa RSM dan metode Taguchi akan saling melengkapi sebagai teknik untuk optimasi parameter. RSM dalam penerapannya memerlukan asumsi statistika klasik dan mampu mengakomodasi *steepest ascent* atau *steepest descent* untuk arah optimasi yang tidak bias. Metode Taguchi sangat praktis diterapkan karena tidak perlu memenuhi asumsi statistika klasik dan menjalankan semua kombinasi percobaan yang mungkin.

Penelitian sekarang dilakukan dengan metode *Six Sigma* DMAIC untuk menurunkan COPQ. *Six Sigma* DMAIC dipilih karena merupakan langkah-

langkah sistematis dan terstruktur untuk menyelesaikan permasalahan dengan menerapkan manajemen proses dan ilmu statistika. *Six Sigma* tidak membutuhkan waktu yang lama untuk diimplementasikan dan memerlukan *continous improvement* agar perbaikan semakin mengarah ke tingkat kualitas yang paling tinggi. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya yaitu penelitian ini menggabungkan COPQ, Six Sigma DMAIC, FMEA dan DOE dalam implementasi *Six Sigma*. Penelitian ini juga melibatkan validasi sistem pengukuran dilakukan sebelum tahap *analyze*. Kinerja *output* dievaluasi dengan nilai *sigma*, PPM dan cacat CTQ dominan kemudian dilakukan analisis dengan *cause effect diagram* untuk mencari penyebab masalah. FMEA digunakan untuk mencari prioritas *improvement*. Kolaborasi eksperimen Taguchi dan RSM dilakukan pada tahap *improve*. Evaluasi terhadap COPQ dan nilai *sigma* setelah masa implementasi dilakukan untuk mengetahui apakah telah terjadi penurunan COPQ pada industri tersebut.

2.2. Dasar Teori

Dasar teori berisi mengenai definisi kualitas, biaya kualitas, COPQ, Definisi *Six Sigma*, *Six Sigma* dalam perspektif statistik, *Six Sigma* DMAIC, FMEA, *Attribute Control Chart*, *Attribute Agreement Analysis*, DOE, pengecekan residual model dan uji hipotesis.

2.2.1. Definisi Kualitas

Produk yang berkualitas adalah produk yang bebas dari cacat. Perusahaan akan mendapatkan peningkatan keuntungan apabila perusahaan dapat meminimasi cacat yang terjadi. Keuntungan dapat dicapai dengan cara menurunkan biaya kualitas dan mencegah terjadinya cacat (Crosby, 1996).

Kualitas merupakan kata yang sering dijumpai pada kehidupan sehari-hari, dan memiliki arti yang luas, khususnya pada bidang keteknikan. Berikut adalah definisi kualitas menurut para ahli:

- a. Menurut Juran (1993), kualitas yaitu berhubungan dengan kepuasan pelanggan. Kualitas dapat juga diartikan sebagai kesesuaian untuk digunakan.
- b. Menurut Crosby (1979) yang dikutip oleh Mitra (1998), kualitas merupakan kesesuaian terhadap spesifikasi.

- c. Menurut Garvin (1984), kualitas dibagi menjadi 5 kategori, yaitu sesuatu yang dikenal, luar biasa, mengacu pada produk, pengguna, dan nilai.
- d. Menurut Oakland (2004), kualitas yaitu mengacu pada *customer requirements*.

Menurut beberapa definisi kualitas di atas, dapat disimpulkan bahwa kualitas adalah kesesuaian terhadap spesifikasi yang mengacu pada produk dan nilai yang ditetapkan oleh *customer requirements*.

Kualitas memiliki 2 kelompok karakteristik, yaitu variabel dan atribut (Mitra, 1998). Variabel merupakan karakteristik yang terukur dalam skala numerik. Contoh karakteristik variabel misalnya diameter yang diukur dalam satuan milimeter, panjang yang diukur dalam milimeter dan lain-lain. Ada 2 istilah yang harus didefinisikan sebelum mendefinisikan karakteristik atribut, yaitu *nonconformity* dan *nonconforming*. *Nonconformity (defect)* adalah karakteristik kualitas yang tidak memenuhi standar spesifikasi yang ditetapkan. *Nonconforming (defective)* dapat diartikan ketika suatu produk memiliki satu atau lebih *nonconformities* sehingga tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Atribut merupakan karakteristik dalam kualitas yang tidak dapat diukur dalam skala angka. Contoh karakteristik atribut adalah bau dari parfum yang dikategorikan bau atau tidak, dan diukur dengan cara dicacah.

Penentuan suatu produk *defect* atau tidak, harus didasarkan pada spesifikasi. Spesifikasi adalah kesatuan dari kondisi dan permintaan yang menyediakan deskripsi detail dari prosedur, proses, material, produk, atau jasa dan digunakan di lingkup manufaktur (*U.S. National Bureau of Standards*, 1983).

2.2.2. Biaya Kualitas

Salah satu ukuran performansi dari kualitas adalah biaya yang terasosiasi pada kualitas itu sendiri. Definisi biaya kualitas adalah biaya yang dihasilkan dari produk atau jasa karena ketidaksesuaian terhadap spesifikasi yang diinginkan oleh pelanggan (Campanella, 1999). Hansen dan Mowen (2007) mendefinisikan biaya kualitas sebagai biaya yang muncul akibat adanya kegiatan yang berkaitan dengan kualitas, yaitu pengendalian dan aktivitas karena terjadi kegagalan. Berdasarkan beberapa pendapat di atas, dapat disimpulkan bahwa biaya kualitas adalah biaya yang berkaitan dengan adanya kegiatan pengendalian dan terjadi karena ada ketidaksesuaian produk atau jasa. *American Society of Quality Control* mendefinisikan 4 kategori utama dari biaya kualitas, antara lain:

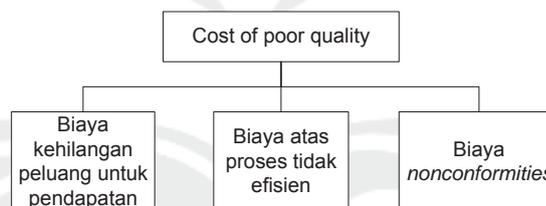
- a. *Prevention costs.*
- b. *Appraisal costs*
- c. *Internal failure costs*
- d. *External failure costs*

2.2.3. Cost of Poor Quality

Biaya kegagalan (*cost of poor quality*) adalah biaya selama proses yang menimbulkan ketidaksesuaian dari bahan baku sampai produk jadi. Ada beberapa alasan mengapa perusahaan wajib mengukur COPQ, antara lain:

- a. Menghitung seberapa besar permasalahan kualitas dalam satuan uang untuk dikomunikasikan antar manajer dalam perusahaan.
- b. Mencari peluang untuk menurunkan COPQ.
- c. Mengurangi kemungkinan penyebab ketidakpuasan pelanggan dan ancaman terhadap daya jual produk.
- d. Mengevaluasi peningkatan kualitas saat ini
- e. Dengan mengetahui COPQ, perusahaan terarah untuk merencanakan kualitas dengan tujuan tertentu.

COPQ terdiri dari *internal failure cost* dan *external failure cost*. Gryna dkk (2007) menyebutkan ada 3 komponen utama dalam COPQ, seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Komponen Cost of Poor Quality

Sumber: Gryna dkk (2007)

a. *Internal Failure Costs*

Internal failure costs muncul ketika produk, komponen, material, dan jasa gagal untuk memenuhi persyaratan kualitas sebelum produk tiba ke tangan pelanggan. Biaya ini akan hilang apabila tidak ada *nonconformities* pada produk. *Internal failure costs* berupa biaya *scrap*, *rework* untuk material, tenaga kerja, dan *overhead*. Selain itu, biaya untuk inspeksi dan pengujian produk selama proses produksi berlangsung juga termasuk ke dalam *internal failure costs* (Mitra, 1998).

Menurut Gryna dkk (2007), *internal failure costs* adalah biaya defisiensi yang ditemukan sebelum pengiriman yang terasosiasi dengan kegagalan untuk memenuhi persyaratan dari pelanggan. Biaya ini akan hilang apabila tidak ada defisiensi. *Internal failure costs* terdiri dari biaya kegagalan untuk memenuhi permintaan *customer*, dan biaya atas proses tidak efisien.

Biaya yang muncul akibat gagal memenuhi permintaan *customer* dapat berupa:

- i. *Scrap*. Tenaga kerja, material dan biaya *overhead* pada produk cacat yang tidak dapat diperbaiki.
- ii. *Rework*. Proses untuk memperbaiki cacat pada produk.
- iii. Salah atau kehilangan informasi. Mendapatkan informasi yang seharusnya tidak diberikan.
- iv. Analisis kegagalan, melakukan investigasi produk cacat untuk menemukan penyebabnya.
- v. *Scrap* dan *rework* karena *supplier*. Biaya ini terjadi karena produk dari *supplier* yang tidak bagus.
- vi. Inspeksi 100%, dengan memeriksa semua produk yang diproduksi.
- vii. Reinspeksi dan *retest*, yang dilakukan setelah produk di-*rework*.
- viii. Mengubah proses untuk mengurangi defisiensi
- ix. Mendesain ulang *hardware* dan *software* untuk memperbaiki cacat produk.
- x. Membuang produk yang di-*reject*.
- xi. *Scrap* pada operasi pendukung (proses produksi tidak langsung)
- xii. *Rework* dalam operasi pendukung
- xiii. *Downgrade*, yaitu penurunan harga jual akibat kualitas buruk.

Biaya yang muncul karena proses tidak efisien antara lain:

- i. Variabilitas dari karakteristik produk, merupakan kerugian yang muncul karena kelebihan spesifikasi karakteristik. Contoh: pengisian cairan yang berlebihan dari standar.
 - ii. *Downtime* mesin tidak terencana akibat kegagalan yang terjadi.
 - iii. Penyusutan inventori, yaitu tidak sesuai antara jumlah inventori aktual dengan yang tercatat.
 - iv. Aktivitas tidak bernilai tambah.
- b. *External failure costs*

External failure costs muncul ketika produk tidak menghasilkan kepuasan kepada *customer* setelah dikirimkan. Jika tidak ada produk *nonconforming*, biaya ini akan

hilang. Contoh *external failure costs* adalah garansi, investigasi, transportasi, perbaikan, dan penggantian terhadap *nonconforming products* (Mitra, 1998).

Menurut Gryna dkk (2007), *external failure costs* terasosiasi dengan defisiensi yang ditemukan setelah produk diterima oleh konsumen. *External failure costs* dibagi menjadi 2 subkategori, yaitu biaya akibat gagal memenuhi permintaan customer dan biaya kehilangan pendapatan.

Biaya yang muncul akibat gagal memenuhi permintaan *customer* dapat berupa:

- i. Biaya garansi yang dikeluarkan untuk mengganti produk yang cacat.
- ii. Pengaturan keluhan, yaitu biaya untuk mengatur dan menginvestigasi atribut komplain pelanggan.
- iii. Produk yang dikembalikan, yaitu biaya penerimaan produk dari pelanggan.
- iv. Kelonggaran, yaitu biaya berupa diskon kepada customer akibat produk yang tidak sesuai keinginan pelanggan.
- v. Penalti, yaitu biaya yang dikenakan akibat keterlambatan pengiriman produk kepada pelanggan (tetapi produk tidak cacat).
- vi. Pendapatan hilang karena gagal untuk menagih pembayaran *customer*
- vii. *Rework* setelah produk diterima *customer*.

Kehilangan peluang untuk pendapatan misalnya pelanggan tidak mau membeli lagi karena sering menerima produk cacat. Hal ini dapat terjadi pada pelanggan baru maupun pelanggan tetap selama ini.

Besarnya jumlah biaya kualitas sangat penting sebagai dasar pengukuran biaya kualitas. Namun untuk mengevaluasi biaya kualitas dari waktu ke waktu, besarnya jumlah tidak bisa digunakan sebagai acuan karena kondisi lapangan selalu berubah. Jumlah unit yang diproduksi selalu berubah, mengakibatkan biaya total tidak bisa dibandingkan (Mitra, 1998). Dasar pengukuran berupa indeks biaya tenaga kerja, biaya produksi, dan unit produksi diperlukan. Satuan indeks biaya tenaga kerja berupa biaya kualitas per jam tenaga kerja atau biaya kualitas per biaya tenaga kerja. Indeks biaya produksi biasanya berupa biaya kualitas per biaya produksi. Biaya produksi terdiri dari biaya tenaga kerja langsung, material dan *overhead*. Indeks unit produksi biasanya berupa biaya kualitas per unit *output* produksi.

c. *Hidden Cost of Poor Quality*

Dalam proses pencarian atau identifikasi COPQ, terkadang banyak elemen biaya yang terlewatkan karena tidak terlibat langsung dalam proses produksi. Padahal

elemen-elemen biaya tersebut menjadi faktor kritis. (Gryna dkk, 2007). Ilustrasi COPQ tersembunyi terdapat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Hidden Cost of Poor Quality

Sumber: Juran dan Gryna F.M. (1993)

2.2.4. Definisi Six Sigma

Beberapa definisi *Six Sigma* menurut ahli yaitu:

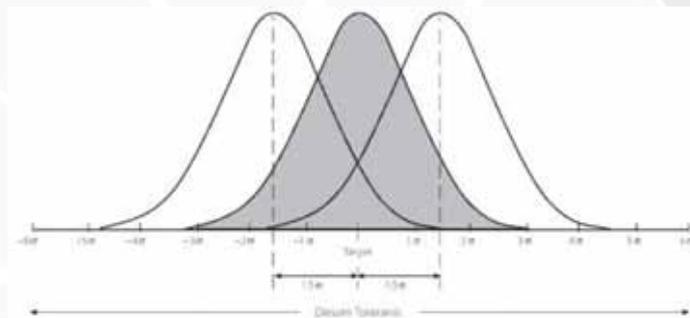
- Six Sigma* merupakan merupakan metode pengendalian dan peningkatan kualitas yang berfokus pada proses sehingga mencapai 3,4 cacat dalam satu juta kemungkinan. *Six Sigma* dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya kualitas (Pyzdek, 2003).
- Six Sigma* merupakan metode atau filosofi yang baru dalam bidang manajemen kualitas untuk mengendalikan dan meningkatkan kualitas (Gasperz, 2001).
- Six Sigma* adalah metode yang fleksibel dan komprehensif untuk menyukseskan bisnis yang ada (Pande, 2002).
- Pendekatan *Six Sigma* adalah kumpulan teknik, konsep manajerial dan statistika yang berfokus pada penurunan variasi dalam proses dan mencegah cacat pada produk (Gryna dkk, 2007).

Menurut beberapa definisi di atas, dapat disimpulkan bahwa *Six Sigma* adalah metode komprehensif atau filosofi untuk mengendalikan, meningkatkan kualitas dengan menerapkan konsep manajerial, statistika dan teknik untuk menurunkan variasi serta cacat produk.

2.2.5. Six Sigma dalam Perspektif Statistik

Dalam perspektif statistik, *Six Sigma* adalah proses yang menghasilkan 3,4 DPMO (*defect per million opportunities*). Konsep *Six Sigma* berasal dari

spesifikasi desain dalam bidang manufaktur serta kemampuan proses untuk mencapai spesifikasi tersebut. Konsep *Six Sigma* berasal dari distribusi normal dengan *mean* dan standar deviasi. Tingkatan kualitas *Six Sigma* adalah tingkat yang setara dengan variasi proses sejumlah setengah dari yang ditoleransi oleh tahap desain dan dalam waktu yang sama memberi kesempatan agar *mean* produksi bergeser sebanyak 1,5 standar deviasi dari target (Evans dan Lindsay, 2007). Jika proses bergeser satu arah sebanyak 1,5 standar deviasi, maka kemungkinan cacat maksimal adalah sejumlah 3,4 per satu juta kejadian. Sedangkan apabila proses bergeser dua arah kemungkinan cacat adalah sejumlah 6,8 per satu juta kejadian. Apabila proses dipertahankan di tengah (tidak ada pergeseran), maka kemungkinan cacat maksimal adalah satu per satu miliar kejadian. Konsep pergeseran *mean* proses pada *Six Sigma* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Konsep Six Sigma

Sumber: Evans dan Lindsay (2007)

Jumlah cacat untuk beberapa pergeseran proses satu arah dari *mean* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Jumlah cacat dengan Pergeseran n-Sigma dari Mean Proses

Pergeseran	Tingkat Kualitas						
	3-sigma	3,5-sigma	4-sigma	4,5-sigma	5-sigma	5,5-sigma	6-sigma
0	1350	233	32	3,4	0,29	0,017	0,001
0,25-sigma	3.577	666	99	12,8	1,02	0,1056	0,0063
0,5-sigma	6.440	1.382	236	32	3,4	0,71	0,019
0,75-sigma	12.288	3.011	665	88,5	11	1,02	0,1
1-sigma	22.832	6.433	1.350	233	32	3,4	0,39
1,25-sigma	40.111	12.201	3.000	577	88,5	10,7	1
1,5-sigma	66.803	22.800	6.200	1.350	233	32	3,4
1,75-sigma	105.601	40.100	12.200	3.000	577	88,4	11
2-sigma	158.700	66.800	22.800	6.200	1.300	233	32

Sumber: Evans dan Lindsay (2007)

Defect per million opportunities (DPMO) merupakan kemungkinan jumlah produk cacat yang terjadi dalam satu juta kemungkinan. Perhitungan DPMO ditetapkan sebagai dasar untuk kalkulasi nilai *Sigma*. Konsep DPMO dimulai dari adanya perhitungan *defect per unit* (DPU), *total opportunities* (TOP) dan *defect per opportunities* (DPO). Perhitungan DPU, TOP, DPO, dan DPMO dapat dilihat pada persamaan 2.1 sampai 2.4.

$$DPU = \frac{D}{U} \quad (2.1)$$

$$TO = O \times U \quad (2.2)$$

$$DPO = \frac{D}{TO} \quad (2.3)$$

$$DPMO = DPO \times 10^6 \quad (2.4)$$

Keterangan:

D = jumlah *nonconformities* yang terjadi pada produk secara keseluruhan

U = jumlah produk yang diperiksa

O = jumlah peluang terjadinya cacat pada satu produk (jumlah CTQ)

TO = jumlah peluang terjadinya cacat pada semua produk

DPU = jumlah *nonconformities* per unit

DPO = jumlah *nonconformities* per peluang kejadian

DPMO = jumlah cacat per satu juta kejadian

Hasil perhitungan DPMO dikonversi ke nilai *sigma*. Proses pengkonversian DPMO ke nilai *sigma* dapat dilakukan dengan bantuan *software Microsoft Excel*. Persamaan untuk melakukan konversi dari nilai DPMO ke nilai *sigma* dapat dilihat pada persamaan 2.5. Persamaan untuk melakukan konversi dari nilai *sigma* ke DPMO dapat dilihat pada persamaan 2.6.

$$Sigma = \text{NORMSINV} \left(\frac{(10^6 - DPMO)}{10^6} \right) + 1,5 \quad (2.5)$$

$$DPMO = 10^6 - (\text{NORMSDIST}(Sigma - 1,5) \times 10^6) \quad (2.6)$$

NORMSINV adalah fungsi untuk mengembalikan *cumulative distribution function* ke bentuk Z. NORMSDIST adalah fungsi untuk mengubah Z ke dalam bentuk *cumulative distribution function*.

Pencapaian kualitas juga dapat dilihat dari persentase produk cacat atau *Part per Million* (PPM). PPM merupakan jumlah produk cacat yang diproduksi dalam satu juta kejadian. Perhitungan PPM dapat dilihat pada persamaan 2.7.

$$PPM = \frac{\text{Defective}}{U} \times 10^6 \quad (2.7)$$

2.2.6 Metodologi Six Sigma DMAIC

Six Sigma diterapkan oleh Motorola pada tahun 1980-an. Motorola mencanangkan tujuan untuk meningkatkan kualitas sepuluh kali lipat pada tahun 1989, 100 kali lipat pada tahun 1991, mencapai 6 *sigma* pada tahun 1992, dan menetapkan budaya perbaikan secara terus-menerus untuk meraih kepuasan pelanggan. Tujuan yang paling utama adalah nol kesalahan untuk setiap hal yang dilakukan. (Evans dan Lindsay, 2007). Kerangka perbaikan dengan metodologi *Six Sigma* adalah DMAIC. Metodologi *Six Sigma* DMAIC adalah metode penyelesaian masalah dengan 5 langkah, yaitu: *Define, Measure, Analyze, Improve* dan *Control*.

a. *Define*

Pada fase *Define* yaitu mengidentifikasi proyek potensial, memilih proyek, dan membangun tim proyek (Gryna dkk, 2007). Langkah-langkahnya yaitu:

1. Mengidentifikasi proyek potensial

Tahap ini terdiri dari mencalonkan, menyeleksi, dan memilih proyek. Proyek dipilih harus meningkatkan kepuasan customer dan menurunkan COPQ. Untuk mencalonkan proyek, bisa didapatkan dari *Voice of Customer*, analisis data COPQ, masukan dari penjualan, *customer service*, semua level manajemen di perusahaan, adanya *gap* antara tujuan dan performansi aktual.

2. Mengevaluasi, memilih cakupan proyek dan membangun tim proyek

Proyek *Six Sigma* yang akan dipilih harus "*meaningful and manageable*" (Pande, 2002). Cakupan proyek yang dipilih harus mempertimbangkan besarnya dampak, penghematan, kemungkinan sukses yang tinggi, serta lama pengimplementasian. Lingkup proyek harus ditentukan untuk berfokus pada satu permasalahan yang kronis dan dilanjutkan dengan memilih tim proyek.

3. Menyiapkan pernyataan permasalahan

Pernyataan masalah dalam *Six Sigma* dapat diidentifikasi dengan menggunakan 5W +2H (*What, Where, When, Who, Why, How, How Much*).

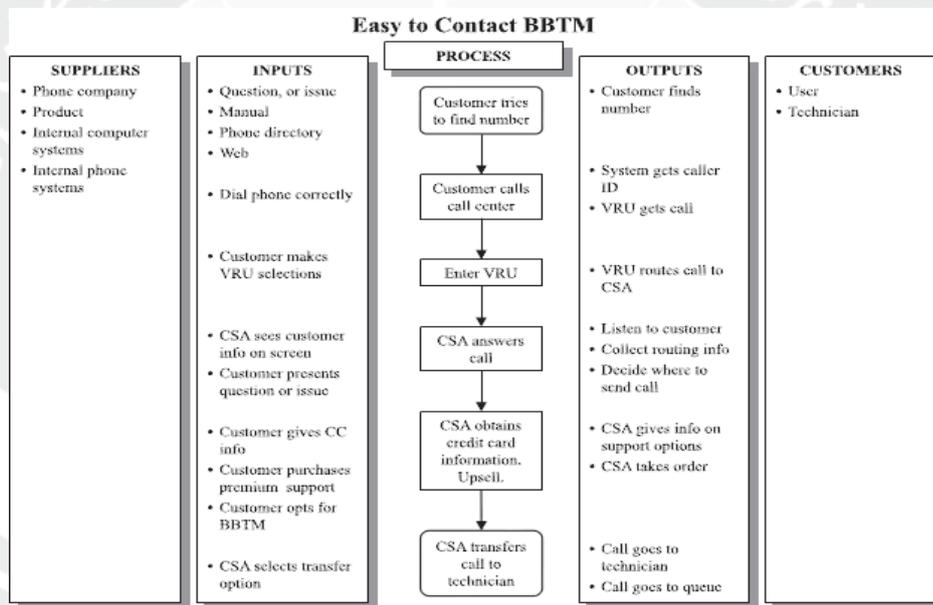
4. Menentukan tujuan

Benbow dan Kubiak (2009) menyebutkan bahwa tujuan proyek *Six Sigma* harus tergolong dalam SMART (*Specific, Measureable, Achievable, Relevant, and Timely*). *Specific* yaitu khusus, tidak memberi makna ambigu, menggunakan kata kerja meningkatkan, menurunkan atau menghilangkan dan lain-lain. *Measurable* yaitu memiliki ukuran atau indikator pengukuran yang dijadikan sebagai pedoman berhasil atau tidaknya proyek yang dijalankan. *Achievable* berarti harus dapat

tercapai dengan usaha yang telah dilakukan. *Relevant* yaitu proyek yang dijalankan harus memberi manfaat bagi organisasi. *Timely* yaitu proyek dapat dijalankan pada suatu jangka waktu tertentu yang telah ditetapkan.

5. Mengidentifikasi proses bisnis melalui SIPOC

Proses bisnis dapat dilihat dengan diagram SIPOC. Diagram SIPOC menggambarkan interaksi rantai dari *supplier* sampai menuju *customer*. *Supplier* merupakan orang yang menyediakan informasi atau sumber daya yang digunakan untuk proses produksi. *Input* adalah semua sumber daya yang diberikan kepada proses untuk menghasilkan *output*. *Output* merupakan keluaran dari proses berupa barang atau jasa. *Customer* merupakan orang yang menerima *output*. Contoh SIPOC Diagram dapat dilihat pada Gambar 2.4.

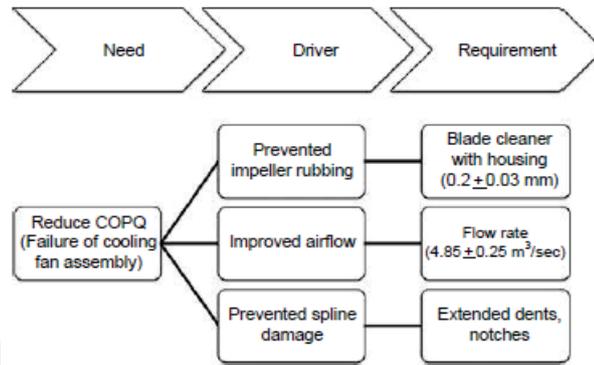


Gambar 2.4. Diagram SIPOC

Sumber: Pyzdek (2003)

6. Mengidentifikasi Faktor *Critical to Quality* (CTQ)

CTQ merupakan karakteristik kualitas pada produk yang berpengaruh terhadap kepuasan pelanggan. *CTQ Tree* merupakan salah satu *tools* untuk mengidentifikasi CTQ pada produk. Langkah pertama dalam pembuatan *CTQ Tree* yaitu mengidentifikasi kebutuhan pelanggan (*need*). Kategori *driver* (pengendali) diidentifikasi untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Selanjutnya adalah mengidentifikasi persyaratan untuk memenuhi masing-masing *driver* tersebut. Contoh *CTQ Tree* terdapat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. CTQ Tree

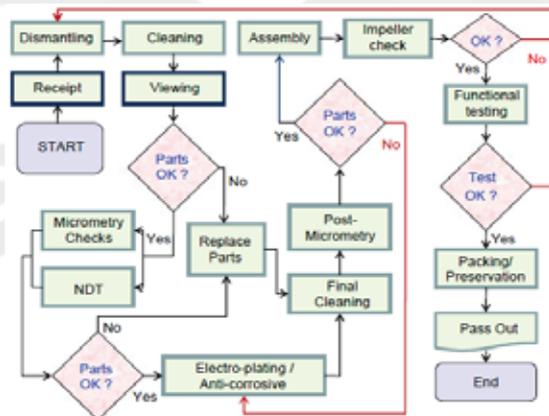
Sumber: Prashar (2014).

b. Measure

Fase *measure* merupakan fase untuk menetapkan pemetaan proses, *measurement system analysis* (MSA), menetapkan rencana pengumpulan data, mengukur *baseline* kinerja berdasarkan DPMO, dan menganalisis kapabilitas proses (Benbow dan Kubiak, 2009).

1. Process mapping

Process mapping digunakan untuk menjabarkan proses-proses sehingga dapat ditemukan kapan terjadi proses yang menimbulkan CTQ. Contoh *process map* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Note: COPQ due to rework is detected in two stages mentioned above and are marked in red line in the diagram

Gambar 2.6. Process map

Sumber: Prashar (2014)

2. Measurement System Analysis

MSA merupakan analisis untuk mengecek sistem pengukuran terhadap standar yang ada. Data yang akan diolah harus *valid* sehingga diperlukan suatu analisis

sistem pengukuran. Sistem pengukuran yang baik adalah sistem pengukuran dengan kesalahan pengukuran yang kecil. Sistem pengukuran yang baik harus akurat dan presisi. Akurat mencakup linearitas, bias, dan stabilitas. Presisi mencakup *repeatability* dan *reproducibility*. MSA dibedakan berdasarkan jenis data, yaitu MSA untuk data kontinyu dan data atribut. MSA untuk data kontinyu adalah *Gage R&R*. MSA untuk data atribut adalah *Attribute Agreement Analysis* (ARR). ARR dijelaskan pada subsubbab 2.2.9.

3. Menentukan rencana pengumpulan data

Rencana pengumpulan data dan penentuan definisi operasional, meliputi hal apa yang akan diukur, definisi pengukuran dan metode pengukuran yang dipakai.

4. Pengukuran *baseline* kinerja

Pengukuran *baseline* kinerja dalam *Six Sigma* dilakukan untuk mengetahui pencapaian nilai *Sigma* sebagai dasar untuk peningkatan kualitas ke arah *zero defect*. *Baseline* kinerja diukur dalam DPMO yang kemudian dikonversi ke nilai *Sigma*. Pengukuran *baseline* kinerja ada 3 tingkat, yaitu:

i. Pengukuran pada tingkat *output*

Pengukuran pada tingkat *output* dilakukan pada saat produk akhir sudah jadi dan akan diserahkan kepada *customer*.

ii. Pengukuran pada tingkat proses

Pengukuran tingkat proses dilakukan untuk memantau masalah kualitas yang terjadi dalam subproses. Hasil pengukuran ini akan memberikan makna seberapa baik proses yang ada.

iii. Pengukuran pada tingkat *outcome*

Pengukuran tingkat *outcome* biasanya melibatkan *feedback* dari customer yang menerima produk jadi Contohnya adalah banyaknya keluhan dari pelanggan.

5. Analisis kapabilitas proses

Analisis kapabilitas proses merupakan pengukuran performansi proses ketika berada dalam kendali. Kapabilitas proses pada data atribut dapat dilihat melalui *attribute control chart* dan persentase cacat yang dihasilkan. Proses dianggap mampu apabila proses berada dalam kendali dan menghasilkan persentase cacat yang kecil. Analisis kapabilitas proses dijelaskan pada subsubbab 2.2.8.

c. Analyze

Fase *analyze* merupakan tahap untuk menganalisis penyebab terjadinya permasalahan. Pada fase ini, tim proyek harus mengidentifikasi penyebab dengan melakukan *brainstorming* dan studi lapangan (Benbow dan Kubiak,

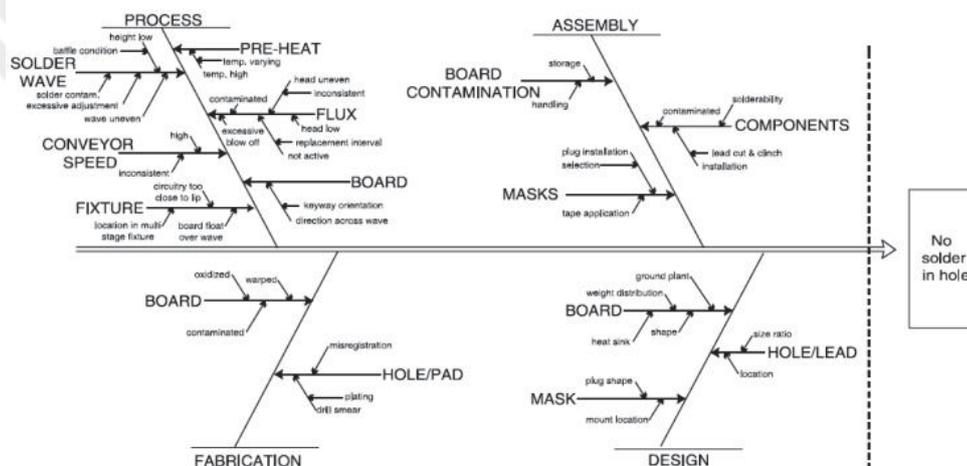
2009). *Tools* yang dapat digunakan pada fase *analyze* antara lain *cause-effect diagram*, *brainstorming*, analisis pareto, regresi, ANOVA, KPIV *impact matrix* dan uji hipotesis.

1. *Cause-effect diagram*

Cause-effect diagram merupakan *analysis tools* yang dikembangkan oleh Dr. Kaoru Ishikawa untuk menganalisis akar penyebab dari suatu permasalahan. Permasalahan ditentukan terlebih dahulu, kemudian *problem solver* melakukan pencarian akar permasalahan melalui beberapa kategori penyebab yang bersangkutan. Menurut Pande (2002), kategori penyebab permasalahan berupa:

- i. Metode, berupa prosedur atau teknik yang digunakan saat bekerja.
- ii. Mesin, berupa teknologi misalnya komputer, peralatan manufaktur, perkakas yang digunakan dalam proses
- iii. Material, berupa bahan, data, instruksi, jumlah fakta, *form*, yang memberi dampak negatif pada *output*
- iv. Pengukuran, yaitu kesalahan data yang berasal dari proses pengukuran atau mengubah tindakan berdasarkan apa yang diukur
- v. Alam, berupa elemen lingkungan, dari cuaca sampai kondisi ekonomi, yang memberikan dampak pada performansi bisnis
- vi. Manusia, merupakan variabel kunci dalam semua elemen di atas untuk menghasilkan *output* bisnis.

Dalam *cause-effect diagram*, penyebab ditelusuri sampai akar permasalahan *ditemukan*. Contoh *cause-effect diagram* dapat dilihat pada Gambar 2.7.

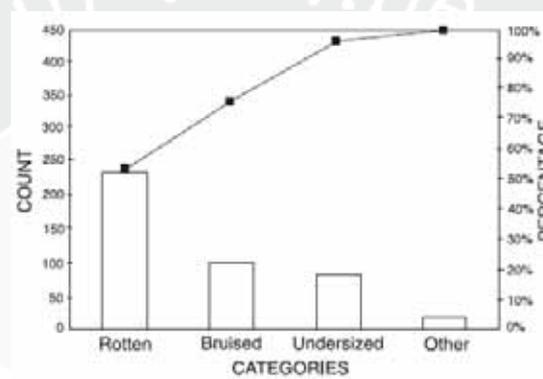


Gambar 2.7. Cause-Effect Diagram

Sumber: Pyzdek (2003)

2. Analisis pareto

Pyzdek (2003) mendefinisikan analisis pareto sebagai proses untuk *me-ranking* peluang potensial yang harus dikerjakan terlebih dahulu. Menurut Prinsip Pareto yang dikemukakan oleh Vilfredo Pareto (1906) dikutip dalam Bass (2007), 80% masalah dapat disebabkan oleh 20% dari penyebabnya. Oleh karena itu, Prinsip Pareto sering disebut dengan aturan 80-20. Pareto disajikan dalam bentuk diagram. Peluang potensial yang harus diprioritaskan adalah kejadian terbanyak pada satu kategori tertentu. Contoh diagram pareto dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Diagram Pareto

Sumber: Pyzdek (2003)

d. *Improve*

Fase *improve* meliputi identifikasi solusi yang layak, mengimplementasikan dan memverifikasi kelayakan solusi tersebut (Benbow dan Kubiak, 2009). Berikut adalah tahapan pada fase *improve*:

1. Mengidentifikasi solusi yang layak

Setelah menemukan akar penyebab dari permasalahan yang ada, solusi yang memungkinkan dicari dan diimplementasi apabila memberi dampak perbaikan yang signifikan terhadap permasalahan. Identifikasi solusi dapat dilakukan dengan FMEA. Penjelasan mengenai FMEA terdapat di subsubbab 2.2.7.

2. Implementasi solusi

Pada saat mengimplementasikan solusi, dilakukan perancangan proses yang baru atau perbaikan untuk meningkatkan proses dengan menggunakan DOE, Poka Yoke, 5S dan sebagainya. Penjelasan DOE terdapat di subsubbab 2.2.10

3. Memverifikasi solusi perbaikan

Solusi diverifikasi setelah diimplementasikan untuk mengetahui apakah perbaikan yang dilakukan telah memberikan dampak positif yang signifikan atau

tidak. Proses verifikasi dapat dilakukan dengan menganalisis FMEA, nilai *sigma*, *cost benefit*, tingkat kecacatan produk setelah implementasi.

e. Control

Ketika proses *improvement* menunjukkan peningkatan yang signifikan, proses harus selalu diawasi agar kondisi ini dapat dipertahankan. Pada fase *control*, dibuatkan prosedur, instruksi kerja, pelatihan, *control chart*, dan *checksheet* untuk mengawasi jalannya perbaikan. *Control* dapat dijadikan dasar untuk *continous improvement* pada proyek selanjutnya untuk mengembangkan kapabilitas proses ke arah yang lebih baik.

2.2.7. Failure Mode Effect Analysis

FMEA menyediakan mekanisme yang sistematis untuk menyelesaikan permasalahan potensial pada produk, sistem dan proses manufaktur. FMEA dikonstruksi berdasarkan keinginan untuk mengestimasi resiko kegagalan, rencana *control* untuk mencegah terjadinya kegagalan dan memprioritaskan aksi perbaikan untuk meningkatkan proses (Yang dan El-Haik, 2003).

FMEA terdiri dari *process FMEA* (PFMEA) dan *design FMEA* (DFMEA). PFMEA digunakan untuk menganalisis *manufacturing* atau *assembly*, dan proses lain yang berfokus pada input proses. DFMEA digunakan untuk menganalisis pada fase perancangan yang bertujuan untuk meningkatkan desain.

Menurut Yang dan El-Haik (2003), langkah untuk implementasi PFMEA yaitu:

- a. Menentukan lingkup dan tahapan prosesnya.
- b. Mengidentifikasi *potential failure mode*. *Failure mode* adalah pernyataan fakta yang mendeskripsikan apa yang terjadi ketika sistem, proses, komponen berpotensi untuk gagal memenuhi spesifikasi desain atau persyaratan performansi.
- c. Mengidentifikasi *potential failure effects*. *Effect* merupakan deskripsi mengenai hal apa yang akan terjadi pada pengguna akibat dari kegagalan.
- d. Mengidentifikasi *severity*. *Severity* merupakan ukuran subjektif yang mengindikasikan seberapa buruk atau serius atas efek yang ditimbulkan akibat terjadinya kegagalan. *Severity* diberikan nilai pada skala 1-10 yang berinterpretasi apabila nilai semakin tinggi, *effect* yang diberikan semakin buruk. *Rating* nilai *severity* dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Rating nilai Severity

Rating	Effect	Deskripsi
1	<i>Negligible severity</i>	Pengguna produk akhir tidak akan memperhatikan kegagalan ini
2	<i>Mid severity</i>	Efek yang dirasakan bersifat ringan, pengguna akhir tidak merasakan perubahan kinerja produk
3		
4	<i>Moderate severity</i>	Pengguna akhir akan merasakan penurunan kinerja atau penampilan namun masih berada dalam batas toleransi
5		
6		
7	<i>High severity</i>	Pengguna akhir merasakan dampak buruk yang tidak dapat diterima dan berada diluar batas toleransi
8		
9	<i>Potential safety problem</i>	Dampak yang ditimbulkan sangat berbahaya bagi keselamatan dan bertentangan dengan hukum yang berlaku
10		

- e. Menentukan penyebab potensial yang menimbulkan terjadinya kegagalan.
- f. Menentukan probabilitas munculnya kejadian atau *occurance*. *Occurance* dihitung berdasarkan peluang munculnya kejadian gagal dari total kemungkinan yang terjadi. *Rating* untuk nilai *occurance* dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Rating nilai Occurance

Rating	Kategori	Peluang muncul	Nilai
1	<i>Remote</i>	1 dalam 1000000	0,0001%
2	<i>Low</i>	1 dalam 200000	0,0005%
3		1 dalam 40000	0,0025%
4	<i>Moderate</i>	1 dalam 10000	0,01%
5		1 dalam 4000	0,025%
6		1 dalam 80	1,25%
7	<i>High</i>	1 dalam 40	2,5%
8		1 dalam 20	5%
9	<i>Very high</i>	1 dalam 8	12,5%
10		1 dalam 2	50%

- g. Mengidentifikasi tindakan pengawasan yang dilakukan saat ini. Apabila saat ini tidak ada tindakan, maka diberikan tindakan perbaikan. Apabila tindakan yang ada saat ini masih menimbulkan kegagalan, maka dibuat tindakan perbaikan yang baru. Tindakan pengawasan ini dibuat untuk mendeteksi kegagalan yang terjadi.
- h. Menentukan *detection*. Deteksi merupakan *rating* subjektif berdasarkan kemungkinan sistem untuk mendeteksi kegagalan dan penyebabnya yang terjadi. *Rating detection* dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Rating nilai Detection

<i>Rating</i>	Deskripsi	Peluang muncul	Nilai
1	Deteksi sangat efektif. Tidak akan ada kesempatan bagi penyebab untuk muncul lagi.	1 dalam 1000000	0,0001%
2	Kemungkinan penyebab untuk muncul adalah sangat rendah	1 dalam 200000	0,0005%
3		1 dalam 40000	0,0025%
4	Kemungkinan penyebab untuk muncul bersifat sedang, kadang-kadang penyebab itu terjadi	1 dalam 10000	0,01%
5		1 dalam 4000	0,025%
6		1 dalam 80	1,25%
7		1 dalam 40	2,5%
8	Kemungkinan penyebab untuk mnucul masih tinggi. Metode deteksi kurang efektif karena penyebab sering terjadi	1 dalam 20	5%
9	Kemungkinan penyebab untuk muncul sangat tinggi. Penyebab selalu terjadi karena metode deteksi tidak efektif	1 dalam 8	12,5%
10		1 dalam 2	50%

- i. Menghitung *risk priority number* (RPN)

RPN merupakan skor hasil kalkulasi yang menunjukkan level resiko kegagalan sehingga menjadi prioritas untuk ditingkatkan apabila skor RPN tinggi. Nilai hasil perhitungan RPN berkisar antara 1 sampai 1000.

Perhitungan RPN dapat dilihat pada persamaan 2.8.

$$RPN = SEV \times OCC \times DET \quad (2.8)$$

- j. Melaksanakan tindakan rekomendasi untuk perbaikan berdasarkan hasil RPN dan tindakan pengawasan yang baru.

- k. Menganalisis ulang PFMEA setelah proses pengimplementasian perbaikan untuk mengetahui apakah terjadi penurunan resiko kegagalan atau tidak.

2.2.8. Attribute Control Chart

Control chart digunakan untuk mengidentifikasi variasi yang terjadi dalam proses kemudian proses dikendalikan agar variasi proses yang timbul tidak mengakibatkan proses diluar batas kendali (Montgomery,1991).

Attribute control chart merupakan grafik pengendali proses berdasarkan statistik yakni distribusi binomial dan poisson. *Attribute control chart* digunakan pada data kualitatif. Data kualitatif tidak didapatkan melalui pengukuran, sehingga tidak memiliki parameter tertentu (hanya dilihat berdasarkan proporsi dan jumlah *item*).

Ada beberapa jenis *attribute control chart* antara lain:

- a. *p-chart*, digunakan untuk menghitung proporsi *item nonconforming*
- b. *np-chart*, digunakan untuk menghitung *number of nonconforming item*
- c. *c-chart* , digunakan untuk menghitung *number of nonconformities item*
- d. *u-chart*, digunakan untuk menghitung *average number of nonconformities per unit*.
- e. *U-chart (Demerit system)*, digunakan untuk mengklasifikasikan jenis cacat berdasarkan tingkat keseriusan cacat yang timbul.

a. Penyebab Variasi dalam Proses

Variasi proses adalah keberagaman dalam suatu proses yang menimbulkan perbedaan dalam kualitas produk yang dihasilkan. Variasi dalam proses terjadi karena 2 (dua), yaitu variasi penyebab umum dan penyebab khusus. Variasi penyebab umum terjadi karena faktor dalam sistem yang selalu melekat pada proses, tetapi tidak begitu mempengaruhi proses karena masih berada dalam batas kendali. Variasi penyebab khusus adalah variasi yang disebabkan oleh kejadian diluar sistem yang bersumber dari manusia, peralatan, material, lingkungan, metode kerja dan lainnya. Variasi penyebab khusus menyebabkan proses tidak terkendali karena memiliki pengaruh yang kuat terhadap kemunculan variasi proses sehingga berada diluar batas kendali (Pyzdek, 2003).

b. Langkah Pembuatan Control Chart

Langkah pembuatan *control chart* yaitu:

1. Menentukan target yang ingin dicapai, sehingga jenis *control chart* yang dipilih sesuai.

2. Menentukan banyaknya sampel dan banyaknya observasi. Apabila data untuk pembuatan *control chart* mewakili jumlah populasi, maka tidak diperlukan penentuan ukuran sampel. Penentuan ukuran sampel dan banyaknya observasi berpengaruh terhadap jenis *control chart* yang dipakai.
3. Mengumpulkan data yang sesuai dengan jenis *control chart* yang dipakai.
4. Menentukan *Center Line* (CL) pada grafik.
5. Menentukan batas kendali yaitu *Upper Control Line* dan *Lower Control Line* (LCL)
6. Memplotkan data masing-masing subgrup ke dalam grafik.
7. Menganalisis pola data dalam grafik, mana data yang *in control* dan *out of control*.
8. Melakukan perbaikan dan merevisi CL dan batas kendali sebagai standar untuk proses selanjutnya.

c. Analisis Pola Control Chart

Pola pada *control chart* harus dianalisis untuk menentukan data subgrup mana saja yang berada dalam kondisi *out of control* atau *in control*. Menurut Montgomery (1991), kriteria plot data pada *control chart* yang dinyatakan *out of control* antara lain:

- a. Satu atau beberapa titik berada diluar batas kendali UCL atau LCL
- b. Satu deret berurutan sebanyak 8 titik data berada antara UCL dan CL atau antara LCL dan CL
- c. Dua atau tiga titik berurutan berada diluar nilai 2-Sigma (batas kendali peringatan) tetapi masih berada dalam batas kendali UCL dan LCL.
- d. Empat atau lima titik berurutan berada diatas nilai 1 sigma.
- e. Terdapat pola *random* yang tidak biasa pada plot data.

d. u-chart

Data *nonconformities* dapat memberikan informasi yang lebih banyak daripada *nonconforming*, karena biasanya terdapat beberapa jenis *nonconformity* yang berbeda dalam satu *item nonconforming*. Hal tersebut mengakibatkan diperlukan adanya perhatian terhadap *average number of nonconformities per unit*.

u-chart merupakan *control chart* atribut untuk menghitung *number of nonconformities per unit* atau DPU. Data yang dibutuhkan untuk mengkonstruksi *u-chart* adalah jumlah masing-masing jenis *nonconformity*, unit inspeksi, jumlah dan ukuran sampel. Unit inspeksi didasarkan pada satuan per luasan. Apabila

satuan unit inspeksi sama dengan satuan ukuran sampel, maka ukuran sampel ditentukan menjadi jumlah unit inspeksi (Montgomery,1991).

u-chart asal mulanya dibentuk dari inspeksi produk 100%. Kenyataannya, produk yang diproduksi selalu tidak sama sehingga ukuran sampel tidak konstan. Hal tersebut mengakibatkan variasi batas kendali akan sesuai dengan ukuran sampel masing-masing subgrup (Montgomery, 1991).

Perhitungan untuk menentukan *average number of nonconformities per unit* untuk ukuran sampel yang berbeda dapat dilihat pada persamaan 2.9.

$$u = \frac{c_i}{n_i} \quad (2.9)$$

Perhitungan CL, UCL dan LCL dan \bar{u} dapat dilihat pada persamaan 2.10 sampai 2.13.

$$CL = \bar{u} \quad (2.10)$$

$$LCL = \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}} \quad (2.11)$$

$$UCL = \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}} \quad (2.12)$$

$$\bar{u} = \frac{\sum c_i}{\sum n_i} \quad (2.13)$$

Keterangan:

u = *number of nonconformities per unit*

n_i = ukuran sampel

c_i = jumlah *nonconformities*

\bar{u} = *average number of nonconformities per unit*

2.2.9. Attribute Agreement Analysis

Data atribut yang dipengaruhi oleh tingkat subjektivitas tiap orang yang berbeda-beda dapat distandarkan melalui suatu standar dan diverifikasi dengan MSA. ARR merupakan metode analisis MSA untuk data atribut. Sistem pengukuran data atribut dikatakan ideal apabila akurat dan presisi (Pyzdek,2003).

a. Akurasi

Akurasi adalah kesesuaian hasil penilaian inspektor terhadap standar yang ada. Pada MSA atribut, pengukuran akurasi tidak dapat dipisahkan masing-masing menjadi linearitas, stabilitas dan bias tetapi dilihat melalui *each appraisers versus standard* dan *all appraisers versus standard*.

b. *Repeatability*

Repeatability adalah kemampuan seorang inspektor untuk memberikan penilaian yang sama (konsisten) ketika memeriksa sampel yang sama. *Repeatability* dilihat melalui *within appraisers*.

c. *Reproducibility*

Reproducibility adalah kesesuaian hasil penilaian antar inspektor ketika memeriksa sampel yang sama. *Reproducibility* dilihat melalui *between appraisers*.

Sistem pengukuran yang baik akan terlihat melalui persentase kesepakatan yang tinggi antar inspektor ataupun terhadap standar yang ada.

Persentase kesepakatan dapat dihitung dengan persamaan 2.14.

$$\text{Persentase kesepakatan} = 100\% \times \frac{m}{n} \quad (2.14)$$

Keterangan:

m = jumlah item yang sesuai

n = jumlah item yang diinspeksi

Tingkat kesepakatan dapat dilihat juga melalui koefisien *kappa*. Menurut Fleiss (1981), *kappa* merupakan koefisien kesepakatan antar inspektor atau inspektor terhadap standar dengan penilaian berupa data nominal. Koefisien *kappa* bernilai antara -1 sampai +1. Interpretasi nilai koefisien *kappa* adalah sebagai berikut:

1. Apabila koefisien *kappa* mendekati nilai +1, berarti antar inspektor memiliki kesepakatan yang hampir sempurna.
2. Apabila koefisien *kappa* bernilai nol, berarti kesepakatan hanya terjadi sewaktu-waktu atau kebetulan saja.
3. Apabila koefisien *kappa* mendekati -1, berarti antar inspektor memiliki penilaian yang bertolakbelakang.

Koefisien *kappa* dibedakan menjadi *Fleiss kappa* dan *Cohen kappa*. *Fleiss kappa* digunakan ketika inspektor yang dibandingkan lebih dari 2 orang. *Cohen kappa* digunakan ketika inspektor yang dibandingkan adalah 2 orang. *Fleiss kappa* dihitung dari proporsi aktual dan harapan frekuensi inspektor setuju. *Fleiss kappa* dapat dikalkulasi untuk per kategori. Penyimpangan *kappa* dikalkulasi untuk mengestimasi variabilitas kesepakatan antar inspektor. Uji Z dapat digunakan untuk mengambil keputusan mengenai signifikansi koefisien *kappa*. Apabila *p-value* lebih kecil dari tingkat signifikansi, maka koefisien *kappa* signifikan.

Langkah untuk mengngkalkulasi koefisien *kappa* yaitu:

1. Menghitung proporsi kesepakatan aktual antar inspektor

Rumus perhitungan proporsi kesepakatan aktual antar inspektor dapat dilihat pada persamaan 2.15.

$$P_o = \frac{1}{Nn(n-1)} (\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k n_{ij}^2 - Nn) \quad (2.15)$$

2. Menghitung proporsi kesepakatan harapan antar inspektor untuk masing-masing kategori.

Rumus perhitungan proporsi dilakukan per kategori, dapat dilihat pada persamaan 2.16.

$$P_j = \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^N n_{ij} \quad (2.16)$$

3. Menghitung proporsi kesepakatan harapan antar inspektor

Rumus dapat dilihat pada persamaan 2.17.

$$P_e = \sum_{j=1}^k P_j^2 \quad (2.17)$$

4. Menghitung koefisien *kappa* untuk masing-masing kategori

Rumus perhitungan koefisien *kappa* dapat dilihat pada persamaan 2.18.

$$k_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k n_{ij}(N-n_{ij})}{Nn(N-1)P_j(1-P_j)} \quad (2.18)$$

5. Menghitung penyimpangan dari koefisien *kappa* dan nilai Z

Perhitungan penyimpangan koefisien *kappa* dan Z digunakan untuk mencari *p-value kappa*. Rumus dapat dilihat pada persamaan 2.19 dan 2.20.

$$se_j = \sqrt{\frac{2}{Nn(N-1)}} \quad (2.19)$$

$$Z_j = \frac{k_j}{se_j} \quad (2.20)$$

Keterangan:

K_j = *Fleiss kappa* untuk masing-masing kategori ke-j

se_j = penyimpangan *kappa* untuk masing-masing kategori ke-j

P_o = proporsi kesepakatan aktual antar inspektor

P_e = proporsi kesepakatan harapan antar inspektor

P_j = proporsi kesepakatan harapan untuk masing-masing kategori

k = jumlah kategori dalam penilaian

n = jumlah inspektor

N = jmlah sampel yang diperiksa

n_{ij} = penilaian inspektor pada sampel ke-i dan kategori ke-j

Z_j = nilai hitung Z untuk kategori ke-j

2.2.10. Design of Experiment

Eksperimen merupakan bagian vital dari metode sains atau keteknikan. Situasi ketika terjadi sebuah fenomena dapat dipahami dengan jelas meliputi pembuatan model matematis merupakan bagian dari eksperimen. Eksperimen didefinisikan sebagai serangkaian percobaan dengan sejumlah penyesuaian atau perlakuan terhadap variabel input proses atau sistem sehingga dapat diteliti dapat diidentifikasi penyebab berubahnya variabel respon (Montgomery, 2009). Jenis-jenis desain eksperimen meliputi desain blok, desain faktorial, desain Taguchi, desain *Response Surface*, dan desain campuran.

a. Prinsip Desain Eksperimen

Eksperimen dianalisis dengan metode statistik sehingga menghasilkan kesimpulan yang *valid*. Eksperimen didasarkan pada 3 prinsip dasar, yaitu:

1. Randomisasi, diterapkan untuk memenuhi asumsi statistik klasik sebagai suatu prosedur pengujian dalam desain eksperimen. Metode statistik memerlukan observasi yang dilakukan secara random yang individual.
2. Replikasi, merupakan pengulangan percobaan. Replikasi perlu dilakukan karena dapat memberikan taksiran kesalahan yang lebih akurat untuk kesalahan eksperimen dan efek rata-rata yang diperoleh untuk suatu faktor.
3. Kontrol lokal (*blocking*), untuk meningkatkan kepresisian antar faktor yang dibandingkan dan mengurangi variabilitas yang disebabkan faktor *noise*.

b. Langkah Desain Eksperimen

Menurut Montgomery (2009), eksperimen yang baik meliputi langkah sebagai berikut:

1. Penentuan pernyataan masalah. Pendekatan tim ahli direkomendasikan untuk menentukan masalah yang dapat diteliti dengan eksperimen. Tujuan dari eksperimen juga dirumuskan, apakah untuk seleksi faktor, optimasi, ataupun konfirmasi.
2. Penentuan variabel respon. Variabel respon yang dipilih harus menyediakan informasi berguna mengenai proses yang dipelajari melalui eksperimen. Hasil pengukuran variabel respon adalah hal fundamental sehingga sistem pengukuran harus akurat dan presisi.
3. Pemilihan faktor, level dan interval. Faktor yang mempengaruhi variabel respon dalam eksperimen diklasifikasikan menjadi faktor kontrol dan faktor *noise*. Faktor kontrol adalah faktor yang dibuat bervariasi dan tetap (konstan) selama percobaan dilakukan. Faktor *noise* harus dihilangkan sehingga hasil

eksperimen yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh faktor kontrol. Interval harus ditentukan dengan baik, tentunya membutuhkan pengetahuan proses. Penentuan level dalam eksperimen didasarkan pada praktek saat ini yang berkontribusi terhadap variabel respon. Pemilihan faktor didapatkan dari *cause-effect diagram*.

4. Pemilihan metode desain eksperimen. Pemilihan metode eksperimen mempertimbangkan ukuran sampel, replikasi, *blocking* atau tidak, urutan percobaan. Waktu, biaya dan batasan lainnya juga menjadi pertimbangan yang utama dalam memilih metode tersebut.
5. Pelaksanaan eksperimen. Pengawasan merupakan hal vital selama pelaksanaan eksperimen agar dipastikan bahwa semua berjalan sesuai perencanaan. Kesalahan prosedur eksperimen dapat merusak validitas eksperimen.
6. Analisis data secara statistik. Statistika diterapkan dalam analisis untuk menghasilkan kesimpulan yang objektif. Analisis dapat dilakukan melalui grafik, model empiris, uji hipotesis maupun estimasi selang kepercayaan. Metode statistik yang diterapkan disesuaikan dengan jenis data dan tujuan dari eksperimen.
7. Kesimpulan dan rekomendasi. Eksperimen harus menghasilkan kesimpulan praktis dan tindakan rekomendasi untuk eksperimen selanjutnya.

c. Metode Taguchi

Genichi Taguchi merumuskan filosofi desain eksperimen yang mengacu pada *off-line quality control*. Peningkatan kualitas bergeser dari proses ke tahap desain untuk mengurangi variabilitas produk dan biaya. Tingkat kualitas dan biaya produk dipengaruhi oleh desain produk dan proses, sehingga diperlukan *robustness*. *Robustness* merupakan ketidaksensitifan proses atau produk terhadap gangguan dari faktor yang tidak terkontrol (*noise factors*), dan *noise factors* harus dikurangi meskipun tidak dapat dihilangkan (Mitra, 1998).

Taguchi merumuskan 3 tahap desain, yaitu:

1. Desain sistem, yaitu menggunakan prinsip dan pengalaman untuk membuat *prototipe* produk yang diinginkan oleh pelanggan serta proses untuk membuat produk tersebut.
2. Desain parameter, meliputi tahap menentukan *setting* optimal dari produk dan parameter dalam proses guna meminimasi variabilitas performansi. Ukuran performansi berupa *signal-to-noise ratio* (*S/N ratio*) digunakan untuk

merepresentasikan seberapa besar pengaruh faktor terkendali terhadap karakteristik kualitas yang dihasilkan.

3. Desain toleransi, yaitu tahap menentukan toleransi sehingga nilai *setting* optimal pada parameter proses tidak dapat diterima. Toleransi yang terlalu sempit mengakibatkan peningkatan biaya. Toleransi yang terlalu besar menimbulkan variabilitas yang tinggi.

Ukuran performansi dalam tahap desain parameter adalah *S/N ratio*, yang diekspresikan dalam 3 target situasi yang diinginkan:

1. *Nominal is the best*, dimana nilai target ditentukan secara spesifik oleh pengguna. Contoh: kecepatan, volume, luas, tekanan dan ketinggian.
2. *Smaller is the best*, dimana nilai target yang diinginkan adalah semakin mendekati nilai nol, mengindikasikan karakteristik kualitas lebih baik.

Rumus untuk menghitung *S/N ratio* terdapat pada persamaan 2.21

$$\eta_{STB} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.21)$$

3. *Larger is the best*, dimana nilai target yang diinginkan adalah semakin besar atau tidak terbatas, mengindikasikan karakteristik kualitas lebih baik.

Faktor yang mempengaruhi karakteristik kualitas:

1. Faktor *signal* (N) merupakan faktor yang mengubah nilai karakteristik kualitas yang akan diukur.
2. Faktor *noise* (X) adalah faktor yang tidak dapat dikendalikan sehingga menyebabkan terjadinya variabilitas produk dari karakteristik kualitas yang diinginkan. Faktor *noise* harus dikurangi bahkan dieliminasi, dengan cara: melakukan perulangan terhadap masing-masing percobaan atau memasukkan faktor *noise* ke dalam percobaan.
3. Faktor kontrol (Z) adalah faktor yang nilainya ditentukan dan dikendalikan oleh desainer dan memiliki level tertentu.
4. Faktor *scaling* (R) adalah faktor yang digunakan untuk mengubah rata-rata level karakteristik kualitas untuk mendapatkan relasi antara faktor *signal* dengan karakteristik kualitas.

Orthogonal array (prinsip *fractional factorial design*) merupakan *layout* desain eksperimen Taguchi dengan menjalankan beberapa bagian dari total percobaan yang mungkin. *Orthogonal array* dipilih berdasarkan jumlah faktor dan level. *Orthogonal array* $L_4(2^3)$ memiliki arti terdapat jumlah percobaan sebanyak 4 kali, 2 level, dan terdapat 3 faktor. *Layout* desain $L_4(2^3)$ dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Desain Taguchi $L_4(2^3)$

	Faktor		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Penentuan *orthogonal array* melibatkan derajat kebebasan (*degree of freedom*).

Penentuan *orthogonal array* harus memenuhi persamaan 2.22.

$$v_{OA} \geq v_T \quad (2.22)$$

Persamaan *degree of freedom* untuk *orthogonal array* dapat dilihat pada persamaan 2.23.

$$V_{OA} = \text{jumlah eksperimen} - 1 \quad (2.23)$$

Keterangan:

V_T = *degree of freedom* total seluruh faktor

V_{OA} = *degree of freedom orthogonal array*

Analisis dilakukan setelah mendapatkan data. Menurut Ton Su (2013), prosedur analisis data untuk optimasi Taguchi adalah sebagai berikut:

1. Estimasi efek dari faktor kontrol

Langkah pertama dalam analisis yaitu menghitung *S/N ratio* masing-masing percobaan sesuai target yang diinginkan. Perhitungan rata-rata *S/N ratio* dilakukan setelahnya dengan menggunakan persamaan 2.24.

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (2.24)$$

Efek pada masing-masing level faktor adalah simpangan dari rata-rata *S/N ratio*. Perhitungan *main effect* atau efek faktor A level 1 (\bar{A}_1) adalah rata-rata total *S/N ratio* dari percobaan dengan *setting* level 1 dalam faktor A. Misalkan terdapat 4 percobaan dengan *setting* level 1, maka perhitungannya dapat dilihat pada persamaan 2.25.

$$\bar{A}_1 = \frac{1}{4} (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4) \quad (2.25)$$

Keterangan:

η_i = *S/N ratio* observasi ke-i

\bar{T} = rata-rata *S/N ratio* total

n = jumlah observasi

2. ANOVA dengan *S/N ratio*

ANOVA merupakan sebuah metode untuk menguraikan variabilitas suatu model berdasarkan sumber variasinya (Montgomery, 2009). ANOVA digunakan untuk mengecek signifikansi pengaruh dari masing-masing faktor terhadap karakteristik kualitas. Menurut Ton Su (2013), perhitungan ANOVA *S/N ratio* meliputi:

i. *Correction Factor (CF)*

Perhitungan CF dapat dilihat pada persamaan 2.26.

$$CF = \frac{(\sum_{i=1}^n \eta_i)^2}{n} \quad (2.26)$$

ii. *Total of sum squares (SS_T)*

Perhitungan SS_T dapat dilihat pada persamaan 2.27.

$$SS_T = \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - CF \quad (2.27)$$

iii. *Sum of squares due to treatments*

Perhitungan $SS_{treatments}$ dapat dilihat pada persamaan 2.28.

$$SS_{treatments} = \frac{1}{n}(A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2) - CF \quad (2.28)$$

iv. *Sum of squares due to error*

Perhitungan SS_E dapat dilihat pada persamaan 2.29.

$$SS_E = SS_T - \sum_{i=1}^n v_{treatments} \quad (2.29)$$

v. *Degrees of freedom*

Degrees of freedom untuk faktor, total dan *error* dapat dilihat dari persamaan 2.30 sampai 2.32.

$$v_{treatments} = n_{treatments} - 1 \quad (2.30)$$

$$v_T = \sum_{i=1}^n v_{treatments} \quad (2.31)$$

$$v_E = v_T - \sum_{i=1}^n v_{treatments} \quad (2.32)$$

vi. *Mean squares*

Mean squares merupakan rata-rata kuadrat yang dihitung dengan membagi SS terhadap *degrees of freedom*. Perhitungan *mean squares* untuk faktor dan *error* dapat dilihat pada persamaan 2.33 dan 2.34.

$$MS_{treatments} = \frac{SS_{treatments}}{v_{treatments}} \quad (2.33)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{v_E} \quad (2.34)$$

vii. *F-ratio*

F-ratio merupakan koefisien dalam distribusi F. Koefisien ini digunakan untuk menguji apakah terdapat pengaruh yang signifikan dari faktor terhadap variabel respon atau tidak. Rumus perhitungan *F-ratio* terdapat pada persamaan 2.35.

$$F - ratio = \frac{MS_{treatments}}{MS_E} \quad (2.35)$$

viii. *P-value* untuk *F-ratio*

P-value digunakan untuk mengambil keputusan pada pengujian ANOVA. *P-value two tail* untuk *F-ratio* dapat dikalkulasi dengan menggunakan software *Microsoft Excel* dengan persamaan 2.36.

$$P - value = FDIST(F - ratio; v_1; v_2) \quad (2.37)$$

FDIST merupakan fungsi excel untuk mengembalikan nilai *F* kedalam bentuk probabilitas. *v1* merupakan *degrees of freedom for the numerator* dan didapatkan dari $v_{treatments}$. *v2* merupakan *degrees of freedom for denominator* dan didapatkan dari v_E .

3. *Pooling up*

Pooling up S/N ratio dirancang oleh Taguchi untuk mengestimasi *variance error* sehingga estimasi yang dihasilkan lebih baik. *Pooling up* dilakukan pada faktor yang tidak berkontribusi secara signifikan terhadap karakteristik kualitas. Strategi *pooling up* mengubah komponen ANOVA dengan menambahkan sumber variasi dari *pooled error*. *Output* akhir dari *pooling up* adalah persen kontribusi yang diberikan oleh faktor yang berpengaruh signifikan terhadap karakteristik kualitas.

Perhitungan *pooling up* meliputi:

i. *Sum of squares pooled error*

$SS_{pooled\ treatments}$ merupakan jumlah dari *SS* masing-masing faktor yang tidak berpengaruh dan SS_E . Perhitungannya terdapat pada persamaan 2.37.

$$SS_{pooled\ error} = SS_E - SS_{pooled\ treatments} \quad (2.37)$$

ii. *Mean squares due to pooled error*

Perhitungan *mean squares* didapatkan dari pembagian $SS_{pooled\ error}$ dengan *degrees of freedom pooled error*. *degrees of freedom pooled error* merupakan jumlah dari *degrees of freedom* masing-masing faktor yang tidak berpengaruh dan V_E . Perhitungannya dapat dilihat pada persamaan 2.38.

$$MS_{pooled\ error} = \frac{SS_{pooled\ error}}{v_{pooled\ error}} \quad (2.38)$$

iii. *Pure sum of squares*

Pure sum of squares dihitung untuk faktor yang berpengaruh signifikan dan *error*. Rumus *pure sum of squares due to treatment* terdapat pada persamaan 2.39.

$$SS'_{treatments} = MS_{treatments} - (MS_{pooled\ error} \times v_{treatments}) \quad (2.39)$$

Rumus *pure sum of squares due to pooled error* terdapat pada persamaan 2.40.

$$SS'_{pooled\ error} = SS_T - \sum_{i=1}^n SS'_{treatments\ ke-i} \quad (2.40)$$

iv. Persen kontribusi

Persen kontribusi meliputi persen kontribusi faktor dan *error*. Persen kontribusi *error* digunakan untuk menganalisis apakah terdapat faktor penting yang hilang dari eksperimen. Persen kontribusi untuk faktor dan *error* dihitung dengan persamaan 2.41 dan 2.42.

$$\text{Persen kontribusi}_{treatments} = \frac{SS_{treatments}}{SS_T} \quad (2.41)$$

$$\text{Persen kontribusi}_{error} = \frac{SS_{pooled\ error}}{SS_T} \quad (2.42)$$

4. Prediksi variabel respon

Estimasi variabel respon dapat dihitung dengan menjumlahkan rata-rata variabel respon pada level optimal kemudian dikurangi dengan rata-rata total. Contohnya, faktor A1 dan B2 berpengaruh, maka perhitungannya dapat dilihat pada persamaan 2.43.

$$\hat{y} = \bar{T}_{A1} + \bar{T}_{B2} - \bar{T} \quad (2.43)$$

d. Response Surface Method

Response Surface Method merupakan kumpulan teknik matematika dan statistika untuk pemodelan dan analisis permasalahan respon yang dipengaruhi oleh beberapa variabel dan tujuannya adalah untuk mengoptimalkan respon. Dua jenis desain yang umum dalam RSM adalah *Central Composite Design (full factorial)* dan *Box-Behnken Design (fractional factorial)*.

Pemodelan dalam RSM ditunjukkan dengan regresi linier yang mengekspresikan hubungan antara variabel respon dengan faktor. Model RSM dianalisis dengan 2 tahap pemodelan. Tahap pemodelan pertama yaitu model orde satu. Titik optimal pada model orde satu dapat dianalisis dengan uji *lack-of-fit*. Hipotesis nol pada uji *lack-of-fit* mengindikasikan bahwa tidak terdapat *lack-of-fit* sehingga model yang diuji sudah layak (sesuai). Apabila pada model orde satu mengandung *lack-of-fit*, maka model orde satu akan diubah ke model orde dua. Apabila tidak terdapat *lack-of-fit*, maka eksperimen harus dijalankan lagi dengan level yang lebih tepat dengan memasuki prosedur *steepest ascent* (Montgomery, 2009).

Persamaan untuk model orde satu dan orde dua dapat dilihat pada persamaan 2.44 dan 2.45.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \epsilon \quad (2.44)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.45)$$

Estimasi β_i dapat dilakukan dengan operasi matriks. Persamaan untuk mengestimasi β_i dalam regresi terdapat pada persamaan 2.46.

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.46)$$

Keterangan:

β_i = konstanta dalam regresi

x_i = variabel independen (faktor)

ϵ = *error* dalam regresi

y = matriks variabel respon

X' = matriks *transpose* variabel independen

Analisis regresi pada RSM dilakukan dengan uji hipotesis secara serentak dan individual. Uji serentak adalah uji secara keseluruhan. Uji individual dilakukan masing-masing faktor. Hipotesis nol pada analisis regresi menunjukkan bahwa tidak ada pengaruh dari faktor yang diuji terhadap variabel respon yang dipilih.

Titik optimum yang diestimasi oleh level yang ditentukan saat eksperimen biasanya berada jauh dengan titik optimum sebenarnya. Pergeseran level faktor dilakukan untuk mencari titik optimum yang sebenarnya. Metode tersebut dikenal dengan metode *steepest ascent* atau *steepest descent*. Metode *steepest ascent* adalah prosedur memindahkan level faktor dengan tujuan untuk memaksimalkan respon. Metode *steepest descent* digunakan untuk meminimasi respon.

Titik stasioner dicari setelah membangun model orde dua. Titik stasioner merupakan lokasi dimana nilai respon adalah maksimum, minimum, atau pelana. Titik stasioner dapat diketahui dengan rumus matriks pada persamaan 2.47.

$$X_s = -\frac{1}{2}B^{-1}b \quad (2.47)$$

B merupakan matriks bujursangkar dengan elemen diagonalnya adalah koefisien kuadrat. Koefisien diluar koefisien kuadrat adalah koefisien regresi orde pertama yang dibagi dengan 2.

Keterangan:

X_s = titik stasioner

B^{-1} = invers matriks B

b = matriks koefisien regresi orde 1

2.2.11. Pengecekan Residual Model

Menurut Montgomery (2009), sebuah model harus memenuhi beberapa asumsi untuk melakukan uji rata-rata atas perlakuan. *Error* dari model harus terdistribusi normal dan independen dengan variansi konstan. Pelanggaran asumsi tersebut dapat dicek melalui plot residual. Persamaan untuk menghitung residual dapat dilihat pada persamaan 2.48.

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.48)$$

Keterangan:

e_{ij} = residual pada perlakuan i observasi ke j

y_{ij} = data perlakuan i observasi ke j

\hat{y}_{ij} = estimasi rata-rata perlakuan ke i observasi ke j

Asumsi-asumsi yang harus dipenuhi antara lain:

a. Asumsi kenormalan

Pengecekan asumsi kenormalan dengan histogram residual. Apabila histogram membentuk kurva distribusi normal, maka asumsi kenormalan terpenuhi. Prosedur lain yang digunakan adalah analisis *normal probability plot of residuals*. Apabila titik residual mengikuti garis lurus, maka terdistribusi normal.

Metode pengujian kenormalan yang universal dan sering digunakan adalah *Goodness of fit*, *Shapiro-Wilk*, *Ryan-Joiner*, *Anderson-Darling*, *Kolmogorov-Smirnov* dan sebagainya.

Anderson-Darling mengukur area antara garis lurus dan plot data (berdasarkan distribusi yang dipilih). Perhitungannya merupakan kuadrat jarak yang terbobot pada ekor distribusi. Koefisien AD yang lebih kecil mengindikasikan data semakin mengikuti distribusi tersebut (D'Agostino dan Stephens, 1986). Hipotesis nol dari AD menduga bahwa data sampel mengikuti distribusi normal. Perhitungan koefisien AD dapat dilihat pada persamaan 2.49 sampai 2.51.

$$A^2 = -N - \left(\frac{1}{N}\right) \sum (2i - 1) (\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{N+1-i}))) \quad (2.49)$$

$$F(Y_i) = \Phi((Y_i - \bar{X})/s) \quad (2.50)$$

$$A'^2 = A^2 * \left(1 + \frac{0,75}{N} + \frac{2,25}{N}\right) \quad (2.51)$$

Perhitungan *p-value* didasarkan A'^2 , dapat dilihat dari persamaan dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6. P-value untuk Anderson-Darling

Nilai A'^2	Rumus perhitungan
$13 > A'^2 > 0,6$	$p = \exp (1,2937 - 5,709 * A'^2 + 0,0186(A'^2)^2)$
$0,6 > A'^2 > 0,34$	$p = \exp (0,9177 - 4,279 * A'^2 - 1,38(A'^2)^2)$
$0,34 > A'^2 > 0,2$	$p = 1 - \exp (-8,138 + 42,796 * A'^2 - 59,938(A'^2)^2)$
$A'^2 < 0,2$	$p = 1 - \exp (-13,36 + 101,14 * A'^2 - 223,73(A'^2)^2)$

Keterangan:

A^2 = koefisien AD

A'^2 = modifikasi koefisien AD

Y_i = sampel data

$\Phi((Y_i - \bar{X})/s) = \text{cdf}$ dari distribusi normal standar

N = jumlah sampel

b. Asumsi homogenitas variansi

Pengecekan asumsi homogenitas variansi dilakukan melalui grafik *Residuals versus fitted values*. Residual harus tersebar acak dan cerminan antara residual akan memenuhi asumsi ini. Apabila residual tidak membentuk pola cerminan, ada kemungkinan bahwa variansi tidak konstan. Hal ini dapat disebabkan oleh data yang tidak normal atau ukuran observasi yang terlalu kecil. Pengujian hipotesis perlu dilakukan untuk mengecek hal tersebut. Homogenitas variansi dapat diuji dengan *F-test*, *Bartlett-test* dan *Levene-test*. *F-test* digunakan apabila sampel yang diuji berjumlah 2 (dua). Pengujian lebih dari 2 variansi dapat diestimasi menggunakan *Bartlett-test*. *F-test* dan *Bartlett-test* mengharuskan data terdistribusi normal sebelum masuk ke prosedur pengujian. Data yang tidak normal dapat diuji dengan menggunakan *Levene-test*.

Bartlett-test menggunakan distribusi *sampling* yang mendekati distribusi *chi-square* dengan derajat kebebasan $a - 1$, a adalah jumlah sampel yang acak dari populasi terdistribusi normal (Montgomery, 2009).

Perhitungan statistik *Bartlett* dapat dilihat pada persamaan 2.52 sampai 2.56.

$$X_0^2 = 2,3026 \frac{q}{c} \quad (2.52)$$

$$q = (N - a) \log_{10} Sp^2 - \sum_{i=1}^a (n_i - 1) \log_{10} s_i^2 \quad (2.53)$$

$$c = 1 + \frac{1}{3(a-1)} (\sum_{i=1}^a (n_i - 1)^{-1} - (n - a)^{-1}) \quad (2.54)$$

$$Sp^2 = \frac{\sum_{i=1}^a (n_i - 1) s_i^2}{N - a} \quad (2.55)$$

$$X_0^2 > X_{\alpha, \alpha-1}^2 \quad (2.56)$$

Keterangan:

X_0^2 = statistik *Bartlett*

$X_{\alpha, \alpha-1}^2$ = nilai *chi-square upper tail*

s_i^2 = variansi sampel populasi ke-i

n_i = sampel ke i

N = jumlah sampel

Nilai statistik *Bartlett* yang besar mengakibatkan hipotesis nol harus ditolak dan dapat disimpulkan bahwa variansi data tidak homogen. Hipotesis nol harus ditolak ketika memenuhi persamaan 2.56.

c. Asumsi independen

Korelasi antar residual akan melanggar asumsi independen. Randomisasi percobaan yang baik tentunya akan memenuhi asumsi independen. Pengecekan asumsi independen dilihat melalui grafik *Residual versus order of the data*. Apabila persebaran residual membentuk pola atau *trend* tertentu, asumsi independen tidak terpenuhi.

2.2.12. Uji hipotesis

Menurut Montgomery (2011), hipotesis statistik adalah pernyataan mengenai parameter satu atau lebih populasi. Pengujian hipotesis adalah sebuah prosedur yang mengarah kepada keputusan melalui hipotesis tertentu. Formulasi hipotesis terdiri dari hipotesis nol dan hipotesis alternatif. Contoh formulasinya adalah sebagai berikut:

$$H_0: \mu = 50 \text{ cm}$$

$$H_0: \mu \neq 50 \text{ cm}$$

Prosedur pengambilan keputusan dapat mengarah pada 2 jenis *error*. *Error* tipe 1 (α) adalah menolak hipotesis nol yang benar. *Error* tipe 2 (β) adalah gagal menolak hipotesis nol yang salah. Pengujian hipotesis dapat dilakukan dengan *one-tail* dan *two-tail*. Pengujian hipotesis dikategorikan *one-tail* apabila hipotesis alternatif melibatkan pernyataan lebih dari atau kurang dari. Apabila melibatkan pernyataan 'tidak sama dengan' merupakan *two-tail*.

Kriteria penolakan H_0 ditentukan oleh nilai α atau tingkat signifikansi. *P-value* mendukung kriteria penolakan H_0 . *P-value* merupakan level signifikansi terkecil untuk menolak hipotesis nol dengan data yang ada. Implikasi hal tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil *p-value*, semakin tinggi keyakinan untuk menolak H_0 .

Prosedur umum untuk pengujian hipotesis yaitu sebagai berikut:

- a. Penentuan parameter: Identifikasi parameter dari konteks permasalahan.
- b. Membuat hipotesis nol
- c. Membuat hipotesis alternatif
- d. Memilih pengujian statistik yang sesuai
- e. Menyatakan kriteria penolakan H_0
- f. Perhitungan statistik
- g. Menyimpulkan apakah H_0 harus ditolak atau tidak dan melaporkannya sesuai konteks permasalahan.

Beberapa jenis pengujian dalam uji hipotesis misalnya:

- a. Tes rata-rata dengan distribusi normal, variansi diketahui (*Z-test*)

Tes rata-rata dengan variansi diketahui, uji statistika yang digunakan untuk 1 populasi dapat dihitung dengan persamaan 2.57.

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (2.57)$$

Tes rata-rata 2 populasi dapat dihitung dengan persamaan 2.58.

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2.58)$$

P-value two-tail dapat dicari dengan rumus pada persamaan 2.59.

$$P - value = 2(1 - \Phi|Z|) \quad (2.59)$$

Keterangan

- Z = Nilai kritis dalam pengujian statistik
 $\Phi|Z|$ = cdf untuk distribusi normal
 \bar{X} = Rata-rata sampel
 μ = Rata-rata populasi
 \bar{X}_1 = Rata-rata sampel ke-1
 \bar{X}_2 = Rata-rata sampel ke-2
 $\mu_1 - \mu_2$ = Perbedaan rata-rata populasi *jika diketahui
 σ_1 = Standar deviasi populasi ke-1
 σ_2 = Standar deviasi populasi ke-2
 n_1 = Jumlah sampel ke-1
 n_2 = Jumlah sampel ke-2

b. Tes variansi dengan distribusi normal.

Tes variansi digunakan untuk mengetahui variansi suatu populasi 1 dengan yang lainnya memiliki kesamaan atau tidak. Tes variansi 1 populasi menggunakan rumus pada persamaan 2.60.

$$X^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \quad (2.60)$$

Perhitungan tes variansi 2 populasi menggunakan *F-test*, dapat dilihat pada persamaan 2.61.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2.61)$$

Keterangan :

X^2 = Titik kritis (menggunakan tabel *chi-square*)

n = Jumlah sampel

F = Titik kritis distribusi F

S_1^2 = variansi sampel populasi ke-1

S_2^2 = variansi sampel populasi ke-2

c. Tes rata-rata dengan ditribusi normal, variansi tidak diketahui (*t-test*)

t-test terdiri dari pengujian 1 populasi dan 2 populasi. Apabila variansi populasi tidak diketahui pada pengujian 2 populasi, variansi dapat diasumsikan sama (apabila jumlah sampel 1 dan 2 hampir sama) atau tidak sama. Rumus perhitungan pengujian 2 populasi dengan asumsi variansi tidak sama terdapat pada persamaan 2.62.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2.62)$$

Perhitungan *degrees of freedom* terdapat pada persamaan 2.63.

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1-1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2-1}} \quad (2.63)$$

d. Tes proporsi, digunakan untuk menguji populasi dengan karakteristik binomial (sampel berkarakteristik sukses atau gagal).