

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Optimalisasi secara umum adalah pencarian nilai terbaik dari yang tersedia dari beberapa fungsi yang diberikan pada suatu konteks. Dapat dikatakan optimalisasi mengacu pada pemilihan elemen terbaik dari beberapa set alternatif yang tersedia. Dalam kasus yang paling sederhana, dapat diartikan sebagai pemecahan masalah dengan cara untuk meminimalkan atau memaksimalkan fungsi dengan sistematis memilih nilai-nilai variabel integer atau real dari dalam set yang diperbolehkan. Optimalisasi juga berarti upaya untuk meningkatkan kinerja sehingga mempunyai kualitas yang baik dan hasil kerja yang tinggi. Optimalisasi diperlukan untuk mempercepat waktu perencanaan, mengurangi cacat produksi dan meningkatkan kualitas produksi dalam proses injeksi plastik yang kompleks.

2.1.1. Penelitian Pendahulu

Penta (2009) dalam penelitiannya membahas tentang penentuan parameter proses yang mempengaruhi hasil kualitas genteng pada UD. Genteng Super DD Karya manunggal, sehingga dapat menentukan *setting* optimal dengan tujuan meningkatkan kualitas genteng dan meminimalkan cacat produk. Penelitian ini memberikan informasi tentang *setting* parameter optimal yang dapat meningkatkan kualitas genteng dan meminimalkan cacat produk.

Wijaya (2010) dalam penelitiannya membahas tentang penentuan parameter dan penentuan *setting* level yang terbaik atau standar performansi yang terbaik dari mesin *Thermoforming* untuk material plastik jenis *PVC*, *PolyPhropilene*, *PolyEthilen*. Penelitian ini memberikan informasi tentang *setting* faktor yang optimal untuk mesin *thermoforming* dalam pembuatan cetakan plastik.

Daksa (2012) dalam penelitiannya membahas tentang penentuan parameter yang mempengaruhi kualitas produk *fibercement* sehingga dapat menentukan *setting* optimal dengan tujuan meminimalkan jumlah cacat produk. Penelitian ini memberikan informasi tentang *setting* parameter optimal yang meningkatkan kualitas produk *fibercement* dan meminimalkan cacat produk.

2.1.2. Penelitian yang Sekarang

Besarnya permintaan produk plastik yang cepat, murah dan tetap berkualitas bagus menjadikan industri plastik melakukan upaya untuk mendapatkan proses injeksi yang efektif dan efisien. Dalam hal ini, efektif berarti dapat mencapai produk yang berkualitas secara maksimal dan efisien berarti dapat dapat mengurangi atau meminimalkan cacat produk atau error pada *setting* mesin untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Menemukan nilai-nilai optimal dari parameter proses injeksi ketika *shrinkage* diminimalkan menjadi tujuan dari penelitian ini.

Penelitian sekarang ini berbeda dengan penelitian yang sebelumnya dalam mencari parameter yang optimal. Penulis terdahulu seperti penta, wijaya dan daksa melakukan penelitian dengan studi eksperimental taguchi langsung di lapangan, sedangkan penulis melakukan studi eksperimental taguchi dengan bantuan analisis CAE *moldflow*. Penelitian ini mengusulkan sebuah metode baru untuk menemukan proses yang optimal dalam proses injeksi plastik yang menggunakan konsep manufaktur plastik modern.

Penelitian ini mengambil studi kasus dari produk yang diproduksi oleh *Work Injection ATMI Surakarta (WI)*. Produk yang diambil adalah *base plate*. *Base plate* merupakan bagian dari terminal listrik untuk industri elektronik. Produk ini nantinya diproduksi dengan *mold 2 plate* dan *single cavity*.

Metode awal menggunakan metode taguchi untuk mencari parameter yang berpengaruh dan mencari hasil yang paling signifikan. Dengan membandingkan parameter prosesnya, diperoleh respon primer yang paling berpengaruh yaitu penyusutan (*shrinkage*). Metode ini hanya sampai *orthogonal array* dalam membandingkan parameter proses yang signifikan. Parameter yang dibandingkan adalah suhu mold (*mold temperature*), suhu leleh (*melt temperature*), tekanan injeksi (*injection pressure*), waktu injeksi (*injection time*), dan waktu pendinginan (*cooling time*).

Analisis dan optimalisasi proses injeksi plastik menggunakan metode CAE *moldflow dual-domain* yang artinya menggunakan software CAE *Moldflow Plastic Insight (MPI)* dengan *finith element* jenis *meshing dual-domain*. Dari hasil respon primer berupa penyusutan yang paling minimal, data diambil sebagai dasar awal dalam proses analisis *moldflow*. Analisis *moldflow* diawali dengan analisis *meshing dual-domain*. Produk dianalisa pada bagian struktur dengan cara *meshing* yaitu membagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang elemennya

berupa segitiga. Jenis *meshing* yang diambil adalah *dual-domain* yaitu menghitung produk dengan menggabungkan permukaan model untuk menentukan jumlah elemen. Dalam tahap ini juga dicari *aspect ratio* yang paling baik agar proses injeksi optimal dan meminimalkan *error*.

Material plastik sudah ditentukan dari awal. *Molding window* dapat digunakan sebagai pembanding dan pendekatan parameter untuk waktu injeksi, suhu mold dan suhu leleh. Kemudian, *runner system* dapat ditentukan pada produk *base plate*. Lokasi *gate* yang paling baik dan desain *sprue*, *runner* serta *gate* dapat dibuat ketika proses penentuan *runner system*.

Analisis injeksi (*filling*) dilakukan untuk memperoleh hasil berupa waktu injeksi dan memprediksi *weld-line* yang akan terjadi. Dalam proses *filling* dapat dilihat aliran material ketika mengisi *mold* dan daerah mana saja yang kritis.

Analisis *packing* dilakukan untuk menentukan pembekuan material yang seragam. Dalam proses ini dapat dilakukan optimasi *packing* untuk memperoleh *cycle time* yang lebih baik. *Volumetric shrinkage* juga diperoleh dan dianalisa hasilnya agar sesuai dengan tuntutan yang diminta *customer*. Perhitungan *clamp force* dan tekanan *packing* dilakukan pada tahap ini untuk menentukan bahwa *clamp force* mencukupi dan lebih besar daripada *cavity force* ketika proses injeksi plastik. Hasil lainnya dari analisis ini berupa *air traps*, yaitu udara yang terjebak atau rongga yang terbentuk karena gelembung udara pada akhir proses injeksi. Pembuatan *air venting* maupun penempatan *ejector* agar efektif membuang udara yang terjebak dapat dilakukan dengan melihat lokasi *air traps*.

Terakhir, analisis *cooling* dan *warpage* diproses secara bersamaan. Analisis *cooling* dilakukan untuk menentukan sistem pendingin (*cooling*). Efektifitas pendinginan yang diberikan terhadap proses injeksi dapat diketahui dengan analisis ini. Temperatur lintasan pendingin, temperatur lintasan logam, posisi suhu maksimal pada model, efisiensi pelepasan panas pada lintasan, dan perbandingan suhu maksimal pada *cold runner* dan model dapat dilihat dan dievaluasi bersama.

Analisis *warpage* adalah analisis yang digunakan untuk melihat seberapa besar produk mengalami deformasi karena pendinginan yang tidak seragam. *Warpage* dapat dihitung besarnya dilihat dari arah sumbu X, Y atau Z. Bila *warpage* produk *base plate* ini melebihi nilai yang ditentukan maka perlu optimasi *cooling* kembali. Tetapi, bila nilai yang diperoleh dapat diterima, maka nilai tersebut

menjadi panduan ketika proses injeksi di lapangan sebagai *quality control* atas penyusutan produk yang maksimal.

Hasil analisis CAE *moldflow* akan diverifikasi dengan dibandingkan *shrinkage* antara hasil simulasi dengan hasil produksi yang sesungguhnya dimana parameter *setting* mesin injeksi yang digunakan sesuai dengan data yang diperoleh dari CAE *moldflow*. Kemudian, hasil dari semua analisis dirangkum dalam sebuah laporan *moldflow*. Laporan tersebut akan digunakan untuk panduan dalam membuat konstruksi *mold* oleh *engineer mold maker*. Laporan ini juga menyertai *mold* yang telah jadi ketika dikirim ke proses produksi untuk menentukan *setting* parameter pada mesin injeksi.

Hasil akhir dari tulisan ini sudah publikasikan dalam Workshop Penelitian Dosen Pemula di Politeknik ATMI Surakarta pada tanggal 3 Agustus 2015 dan akan dipublikasikan dalam Seminar Nasional Teknik Industri UNS dalam Industrial Engineering Conference (IDEC) pada tanggal 9 September 2015 dan sidang pendadaran.

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Nama (Tahun)	Obyek Penelitian	Studi Kasus	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Software	Output Penelitian
Penta (2009)	Genteng Super DD Hidrolik	UD. Karya Manunggal	Menentukan parameter yang mempengaruhi hasil kualitas genteng dan meminimalkan cacat produk	Taguchi	<i>Minitab</i> <i>Excel</i>	<i>Setting</i> parameter optimal untuk meningkatkan kualitas genteng
Wijaya (2010)	Material Thermoforming	Lab. Proses Produksi ATMA JAYA	Menentukan parameter dan setting level untuk mesin thermoforming	Taguchi	<i>Minitab</i> <i>Excel</i>	<i>Setting</i> faktor optimal untuk mesin thermoforming
Daksa (2012)	Produk <i>fibercement</i> gelombang	PT. Setiaji Mandiri	Menentukan parameter yang mempengaruhi kualitas <i>fibercement</i> dan meminimalkan cacat produk	Taguchi	<i>Minitab</i> <i>Excel</i>	<i>Setting</i> parameter optimal untuk meningkatkan kualitas produk <i>fibercement</i>
Peneliti (2015)	<i>Base Plate</i> dengan proses injeksi Plastik	PUTP dan <i>Work</i> <i>Injection</i> ATMI Surakarta	Menentukan parameter proses optimal pada injeksi plastik untuk minimasi <i>shrinkage</i>	Taguchi <i>Moldflow</i> <i>Dual-domain</i>	<i>Minitab</i> <i>Excel</i> <i>Autocad</i> <i>Inventor</i> <i>MoldFlow</i>	Laporan hasil analisis <i>moldflow</i> dan parameter proses yang optimal pada injeksi plastik untuk meningkatkan kualitas

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Metode Elemen Hingga (*Finith Element*)

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Hal ini sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis. Pendekatan metode element hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam proses penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendeskritan (*discretization*), suatu sistem dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada tiap-tiap bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh.

Metode Elemen Hingga adalah cara numerik dalam menyelesaikan masalah pada ilmu rekayasa dan matematika fisik. Cakupan penyelesaian dari kedua masalah ini berupa analisis struktur, transfer panas, aliran fluida, transportasi massa dan potensial elektromagnetik.

Sebagaimana sebutan elemen hingga, analisis metode elemen hingga didasarkan pada representasi badan atau sistem struktur yang dirakit dari elemen - elemen sistem. Elemen - elemen ini membentuk sistem jaringan elemen melalui sambungan di titik-titik nodal elemen. Umumnya fungsi perpindahan yang ditetapkan bagi pendekatan variasi perpindahan di setiap elemen adalah fungsi polinomial. Persamaan kesetimbangan bagi elemen didapat dari prinsip energi potensial minimum.

Persamaan ini diformulasikan bagi sistem atau badan keseluruhannya dengan perakitan persamaan elemen-elemen dalam sistem koordinat struktur, sedemikian rupa sehingga terpenuhi kontinuitas perpindahan dititik-titik nodal. Dari syarat – syarat batas sistem struktur atau badan yang harus terpenuhi, maka di peroleh perpindahan yang terjadi di titik-titik nodal elemen.

Metode elemen hingga pertama kali diperkenalkan pada tahun 1950. Sejak saat itu metode ini terus menerus dikembangkan. Sekarang metode elemen hingga sudah menjadi alat canggih yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai persoalan teknik dan dipakai secara luas serta diterima oleh banyak bidang industri.

Beberapa aplikasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk analisa:

- a. Masalah struktur:
 - Analisa tegangan: pada struktur rangka, balok dan frame, pada struktur pelat berlubang, dsb.
 - Kejadian tekuk (*Buckling*): pada kolom dan shell.
 - Analisa getaran.
- b. Pada masalah non-struktur:
 - Kejadian transfer panas (*Heat transfer*).
 - Aliran fluida (*Fluid flow*), termasuk aliran dalam media berpori (tanah).
 - Distribusi dari potensi magnetik atau elektrik.
- c. Aplikasi pada *Bio-engineering*.

Metode elemen hingga merupakan prosedur numerik untuk menyelesaikan permasalahan fisik yang diatur dengan persamaan diferensial. Karakteristik metode elemen hingga yang membedakan dengan prosedur numerik yang lain adalah :

- a. Metode elemen hingga menggunakan penyelesaian integral untuk menghasilkan sistem persamaan aljabar.
- b. Metode elemen hingga menggunakan fungsi-fungsi kontinyu sebagian untuk mendeteksi kuantitas atau beberapa kuantitas yang tidak diketahui.

Secara umum Metode elemen hingga terdiri dari lima langkah dasar yaitu :

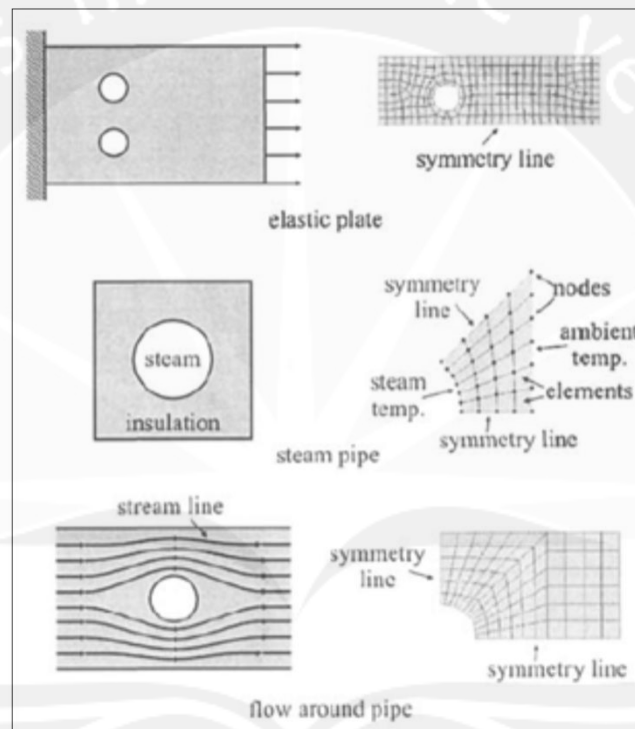
- a. Mendiskritisasikan daerah-daerah yang meliputi penempatan titik-titik nodal, penomoran titik-titik nodal dan penentuan koordinatnya.
- b. Menentukan derajat atau orde persamaan pendekatan linear atau kuadratik. Persamaan harus dinyatakan sebagai fungsi nodal.
- c. Menyusun sistem persamaan-persamaan.
- d. Menyelesaikan sistem persamaan-persamaan.
- e. Menghitung kuantitas yang dicari. Kuantitas dapat merupakan komponen tegangan dan lain-lain.

2.2.2. Analisis Elemen Hingga

Elemen yang umum digunakan dalam analisa struktur ditetapkan dari tanggap sistem struktur terhadap beban luar. Dari unsur-unsur elemen yang telah diuraikan, metode elemen hingga merupakan proses permodelan sistem struktur menggunakan elemen-elemen yang dirakit disebut elemen hingga. Setiap elemen yang dirakit secara langsung maupun tidak langsung pada setiap elemen

lainya melalui nodal-nodal diujung elemen, permukaan atau perbatasan dengan menggunakan sifat – sifat tegangan atau regangan yang diketahui bagi bahan struktur. Dengan cara ini, maka dapat ditentukan perilaku nodal-nodal dalam suatu sistem struktur. Total persamaan perilaku dari setiap nodal menghasilkan satu seri persamaan aljabar yang dinyatakan dalam notasi matriks.

Langkah–langkah bagi formulasi dan solusi metode elemen hingga dipahami secara khusus membahas tipe elemen–elemen sistem struktur, seperti elemen batang aksial, elemen balok, elemen tegangan bidang, elemen tegangan aksimetrik, elemen tegangan ruang dan transfer panas.



Gambar 2.1. Diskritisasi Metode Elemen Hingga

(A First Course in Finite Element, Jacob Fish and Ted Belytschko, 2007)

Langkah-langkah dasar dalam Metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

a. *Processing Phase*

Membuat dan menentukan daerah yang akan diselesaikan menggunakan elemen hingga, kemudian menguraikan masalah menjadi nodal-nodal dan elemen-elemen. Kemudian mengasumsikan bentuk fungsi untuk menggambarkan sifat fisik dari sebuah elemen, yang merupakan pendekatan fungsi kontinu yang diasumsikan untuk menggambarkan solusi

dari sebuah elemen. Penyelesaian persamaan untuk sebuah elemen dibutuhkan untuk menyatukan elemen-elemen dan menghadirkan keseluruhan masalah. Kemudian membentuk matrik kekakuan global *discretize* dan menerapkan kondisi batas, kondisi awal serta pembebanan.

b. *Solution Phase*

Memecahkan satu set persamaan aljabar linier atau non linier secara cepat untuk mendapatkan hasil nodal seperti nilai perpindahan pada nodal-nodal yang berbeda atau nilai temperatur pada nodal-nodal yang berbeda dalam masalah perpindahan panas.

c. *Postprocessing Phase*

Pada sesi ini kita akan mendapatkan informasi penting lainnya. Seperti nilai tegangan (*stress*) dalam analisa statik, distribusi kecepatan mekanika fluida, distribusi temperatur dan lain-lain.

2.2.3. Prinsip Dasar Software CAE Moldflow Plastic Insight (MPI)

Moldflow Plastik Insight adalah perangkat lunak yang paling sering digunakan untuk memodelkan, menganalisa, mengoptimalkan desain produk plastik dan cetaknya. MPI menyediakan beberapa paket yang dapat digunakan untuk pemodelan berbagai jenis proses injeksi plastik dengan berbagai jenis bahan plastik (*thermoplast* dan *termoset*). MPI memungkinkan kita untuk menganalisa, mengevaluasi dan mengoptimalkan bagian produk mulai dari perkiraan desain produksi sampai *setting* parameter proses. Tujuan umum dari pemodelan ini adalah meminimalkan biaya penelitian, mereduksi kesalahan yang mungkin terjadi, dan mengurangi biaya kegagalan.

2.2.4. Langkah Pemodelan dengan CAE Moldflow

A. Pre-Processing

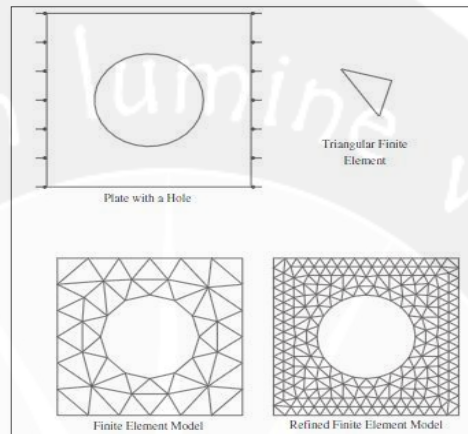
Persiapan untuk simulasi pekerjaan mulai dengan menggambar dimensi serta geometri model yang akan dianalisa. Biasanya, model ini sudah dibuat dalam *3D-CAD (model volume)*. Namun apabila dasar perhitungan hanya akan dilakukan pada permukaan model, maka model yang akan digunakan harus dikonversi menjadi model *.STL atau *.IGS.

Model CAD yang ada (dibuat pada CATIA, Mechanical Desktop, Pro-E, dll) diimpor ke dalam perangkat lunak *Moldflow*. Model dikonversi kedalam format yang *.STL atau *.IGS. Namun tidak menutup kemungkinan untuk membuat

model langsung di MPI, tetapi hanya untuk model dengan bentuk dan dimensi yang sederhana.

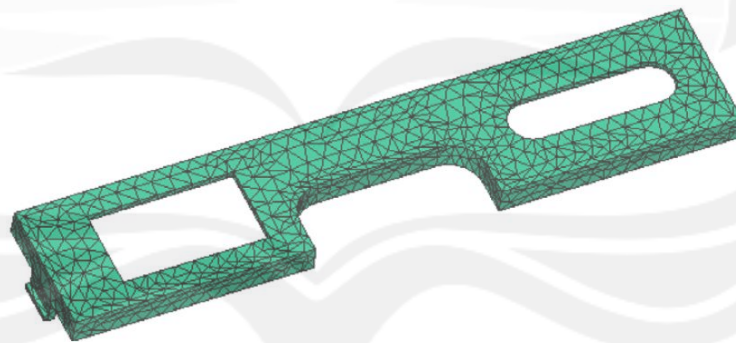
B. Meshing

Sistem dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada tiap-tiap bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh.



Gambar 2.2. Proses Meshing

(A First Course in Finite Element, Jacob Fish and Ted Belytschko, 2007)

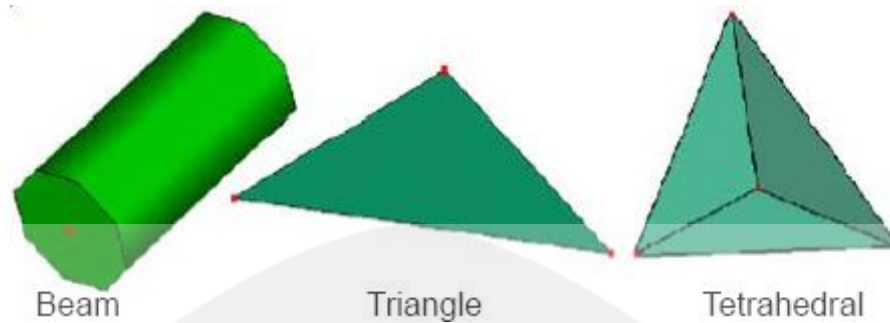


Gambar 2.3. Proses Meshing Produk 3D

(Autodesk Moldflow Insight Performance, Autodesk, 2010)

Terdapat 3 Jenis elemen yang biasa digunakan dalam pemodelan antara lain:

- *Beam*: terdiri dari dua nodal, biasa digunakan untuk memodelkan runner, saluran pendingin, dll.
- *Segitiga*: terdiri dari 3 nodal, biasa digunakan dalam memodelkan produk dan cetakan.
- *Tetrahedron*: terdiri dari 4 nodal, biasa digunakan di geometri produk, *core*, *feed system* (untuk pemodelan 3 dimensi)



Gambar 2.4. Tipe Elemen
(Autodesk Moldflow Insight Performance, Autodesk, 2010)

C. Menentukan Jenis *Meshing*

Jenis *meshing* yang dapat digunakan untuk analisa harus ditentukan untuk menjalankan simulasi ditentukan. Terdapat 3 jenis *meshing* yang dapat digunakan dan merupakan kombinasi dari elemen yang telah disebutkan di atas.

i. *Midplane*

Proses *meshing* dilakukan dengan determinasi ketebalan produk kemudian memilih sebuah permukaan pada pertengahan tebal produk. Bagian permukaan biasanya dibentuk oleh elemen segitiga yang saling terhubung pada sisi dan ketiga nodalnya. Elemen *beam* mungkin dapat digunakan untuk memodelkan geometri tambahan yaitu pada bagian yang akan dibuang (*gate* dan *runner*), serta untuk saluran pendinginan. Analisa hasil pemodelan dengan metode *midplane* dapat dilakukan pada proses: pengisian, penahanan, pendinginan, *warp* dan orientasi serat tambahan.

ii. *Dual-Domain*

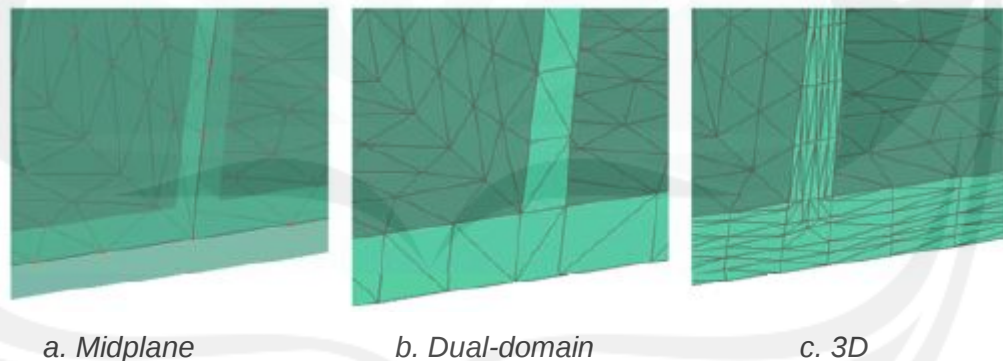
Proses *meshing* dengan metode ini memodelkan produk dengan gabungan permukaan model yang didefinisikan dengan segitiga yang telah ditetapkan sebagai element. Model dapat dideskripsikan sebagai sebuah benda berongga dengan permukaan kulit yang tertutup. Jarak antara kedua permukaan luar dari sistem dapat digunakan untuk mendefinisikan ketebalan dari model. Salah satu faktor penting penentu hasil pemodelan adalah kerapatan *meshing* yang diterapkan pada sistem. Analisa hasil pemodelan dengan metode *dual-domain* dapat dilakukan pada proses: pengisian, penahanan, pendinginan, *warp* dan orientasi serat tambahan.

Pemodelan dengan metode *meshing midplane* dan *dual-domain*

memerlukan beberapa batasan asumsi awal untuk menyederhanakan pemodelan, antara lain: cairan plastic sebagai zat cair *non-newtonian* (melalui modifikasi persamaan *carreau*), aliran zat cair merupakan aliran laminar, gravitasi dan efek inersia pada model diabaikan, konveksi panas di daerah sekitar rongga pada benda juga diabaikan.

iii. 3D

Dalam metode *meshing* 3D, keseluruhan volume model diisi dengan elemen *tetrahedral*. Metode 3D memberikan hasil simulasi yang lebih akurat daripada kedua metode yang lain, dan asumsi serta batasan dapat diminimalkan. Metode ini juga memungkinkan digunakan untuk system yang tebal dan bentuk yang lebih rumit. Namun metode ini membutuhkan waktu yang lebih lama dalam simulasi dibanding dengan metode *midplane* ataupun metode dual-domain. Metode ini biasanya digunakan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat atau apabila kedua metode yang lain sudah tidak memungkinkan untuk digunakan.



Gambar 2.5. Metode Meshing

(Autodesk Moldflow Insight Performance, Autodesk, 2010)

D. Menentukan Proses *Molding* yang akan Dimodelkan

MPI memungkinkan digunakan untuk simulasi beberapa macam proses injeksi molding. Dalam penelitian ini menggunakan *thermoplastiks injection molding*.

E. Memilih Urutan Analisa Pemodelan

Biasanya urutan Analisis dimulai dari penentuan lokasi *gate* injeksi, dan kemudian diikuti dengan proses pengisian, aliran, pendinginan dan *warp*. Kombinasi pendinginan dan aliran atau kombinasi aliran + *warp* + pendinginan juga memungkinkan untuk dilakukan.

F. Memilih Bahan Material

Properti material diperlukan sebagai masukan untuk menjalankan simulasi. Perbedaan jenis bahan dan produsen pengolah menyebabkan tuntutan proses yang berbeda untuk tiap-tiap material. Pemilihan material juga terkait dengan kebutuhan desain.

G. Memilih Lokasi Gate

Lokasi *gate* yang sesuai sangat menentukan hasil akhir dari produk yang dihasilkan. Pertimbangan pemilihan lokasi bertumpu pada efek kritis pada permukaan produk yang dihasilkan. Terdapat banyak hal yang harus dipertimbangkan saat menentukan lokasi *gate*.

Menentukan pengaturan parameter proses: nilai-nilai yang digunakan dalam pengaturan biasanya mengikuti rekomendasi yang diberikan oleh produsen material. Paket ini dapat ditemukan pada *data base* material MPI. Seringkali nilai ini hanya digunakan sebagai nilai awal, karena nilai-nilai tersebut akan berubah seiring dengan proses optimasi dan percobaan yang dilakukan.

H. Pemodelan Runner System

Sistem *runner* merupakan bagian penting dalam merancang sebuah *design molding*. Desain runner yang baik tidak hanya meliputi geometri yang benar, ukuran, serta posisi atau tata letak *runner*, tetapi perlu di perhatikan juga pada sistem *eject* (mengeluarkannya) dan pendinginannya (*cooling system*).

Runner yang seimbang harus menjadi acuan pada saat awal mendesain sebuah *molding*, karna dari situlah kita dapat menghitung waktu yang diperlukan untuk mengalirkan material kedalam *core*. Sebab dari hal ini kita bisa meminimalkan waktu pada saat produksi. Dengan bantuan *Moldflow* para *designer molding* dipermudah dalam medesain. Ukuran panjang, lebar dan bentuk sebuah *runner* dapat kita sesuaikan dengan analisa terhadap produk yang akan kita buat.

I. Memulai Analisa

Setelah sistem selesai dibuat sesuai dengan model yang ditentukan, maka program bisa segera dilakukan komputasi dan analisa.

2.2.5. Jenis-jenis Analisa *Moldflow Plastic Insight*

A. Analisa Lokasi Gate

Lokasi *gate* adalah lokasi di mana polimer disuntikkan ke rongga cetakan. Penentuan lokasi *gate* memiliki peran yang sangat penting untuk properti dan kualitas produk yang dihasilkan. MPI menyediakan alat yang memungkinkan digunakan untuk menemukan lokasi *gate* terbaik dengan mempertimbangkan optimasi desain dan kondisi proses. Tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan aliran lelehan yang optimal.

B. Analisa *Molding Window*

Analisis *molding window* digunakan untuk menghitung kondisi awal proses yang paling baik pada pemodelan. Analisis *molding window* dapat dengan cepat memberikan kita rekomendasi untuk waktu injeksi, temperatur cetakan dan suhu peleburan material yang akan digunakan untuk kondisi awal analisa, dan juga sebagai masukan untuk pemodelan yang akan dibuat.

C. Analisa Aliran (*Flow*)

Analisis aliran mensimulasikan penekanan injeksi saat proses pengisian dan penahanan sehingga arah aliran dari material yang telah mencair dapat diprediksi. Dari analisa ini bias didapatkan perkiraan kualitas dari produk dan efisiensi proses pengisian pada rongga cetakan. Hasil dari analisa pendinginan antara lain:

Tabel 2.2. Hasil Analisa Aliran
(Tutorial *Moldflow Plastic Insight* 2015, Autodesk, 2015)

Hasil Analisa Aliran		
<i>Midplane</i>	<i>Dual-Domain</i>	<i>3D</i>
<i>Fill time</i>	<i>Fill time</i>	<i>Fill time</i>
<i>Pressure at V/P switchover</i>	<i>Pressure at V/P switchover</i>	<i>Pressure at V/P switchover</i>
<i>Temperature at flow front</i>	<i>Temperature at flow front</i>	<i>Temperature at flow front</i>

Hasil Analisa Aliran		
<i>Midplane</i>	<i>Dual-Domain</i>	<i>3D</i>
<i>Bulk temperature</i>	<i>Bulk temperature</i>	<i>Extension rate</i>
<i>Shear rate (bulk)</i>	<i>Shear rate (bulk)</i>	<i>Shear rate</i>
<i>Pressure at injection location (XY plot)</i>	<i>Pressure at injection location (XY plot)</i>	<i>Pressure at injection location (XY plot)</i>
<i>Volumetric shrinkage at ejection</i>	<i>Volumetric shrinkage at ejection</i>	<i>Fiber orientation tensor</i>
<i>Time to freeze</i>	<i>Time to freeze</i>	<i>Freeze time</i>
<i>Frozen layer fraction</i>	<i>Frozen layer fraction</i>	<i>Shear rate (maximum)</i>
<i>% shot weight (XY plot)</i>	<i>% shot weight (XY plot)</i>	<i>Flow rate, beam</i>
<i>Air traps</i>	<i>Air traps</i>	<i>Air traps</i>
<i>Average fiber orientation</i>	<i>Average fiber orientation</i>	<i>Density</i>
<i>Average velocity</i>	<i>Average velocity</i>	<i>Temperature</i>
<i>Clamp force centroid</i>	<i>Clamp force centroid</i>	<i>Velocity</i>
<i>Clamp force (XY plot)</i>	<i>Clamp force (XY plot)</i>	<i>Clamp force (XY plot)</i>
<i>Fiber orientation tensor</i>	<i>Fiber orientation tensor</i>	<i>Viscosity</i>
<i>Flow rate (beams)</i>	<i>Flow rate (beams)</i>	<i>Polymer fill region</i>
<i>Grow from</i>	<i>Grow from</i>	

Hasil Analisa Aliran		
<i>Midplane</i>	<i>Dual-Domain</i>	<i>3D</i>
<i>In-cavity residual stress in 1st principal direction</i>	<i>In-cavity residual stress in 1st principal direction</i>	
<i>In-cavity residual stress in 2nd principal direction</i>	<i>In-cavity residual stress in 2nd principal direction</i>	
<i>Orientation at core</i>	<i>Orientation at core</i>	
<i>Orientation at skin</i>	<i>Orientation at skin</i>	
<i>Poisson's ratio (fiber)</i>	<i>Poisson's ratio (fiber)</i>	
<i>Pressure</i>	<i>Pressure</i>	<i>Pressure</i>
<i>Recommended ram speed (XY plot)</i>	<i>Recommended ram speed (XY plot)</i>	
<i>Shear modulus (fiber)</i>	<i>Shear modulus (fiber)</i>	
<i>Shear stress at wall</i>	<i>Shear stress at wall</i>	
<i>Sink index</i>	<i>Sink index</i>	
<i>Tensile modulus in 1st principal direction</i>	<i>Tensile modulus in 1st principal direction</i>	
<i>Tensile modulus in 2nd principal direction</i>	<i>Tensile modulus in 2nd principal direction</i>	
<i>Throughput</i>	<i>Throughput</i>	
<i>Volumetric shrinkage</i>	<i>Volumetric shrinkage</i>	<i>Volumetric shrinkage</i>
<i>Bulk temperature at end of fill</i>	<i>Weld lines</i>	

D. Analisa Pendinginan (*cooling*)

MPI menyediakan alat untuk pemodelan analisa rangkaian sistem pendingin pada cetakan yang digunakan untuk menganalisa efisiensi sistem pendinginan cetakan itu. Memungkinkan pengguna untuk melakukan analisa serta mengoptimalkan desain cetakan dan sirkuit pendinginan agar mencapai distribusi temperatur yang seragam, meminimalkan waktu siklus, menghilangkan deformasi akibat faktor pendinginan, dan menurunkan biaya manufaktur secara keseluruhan. Hasil dari analisa pendinginan antara lain:

Tabel 2.3. Hasil Analisa Pendinginan
(Tutorial Moldflow Plastic Insight 2015, Autodesk, 2015)

Hasil Analisa Pendinginan		
<i>Midplane</i>	<i>Dual-Domain</i>	<i>3D</i>
<i>Circuit coolant temperature</i>	<i>Circuit coolant temperature</i>	<i>Circuit coolant temperature</i>
<i>Circuit flow rate</i>	<i>Circuit flow rate</i>	<i>Circuit flow rate</i>
<i>Circuit Reynolds number</i>	<i>Circuit Reynolds number</i>	<i>Circuit Reynolds number</i>
<i>Circuit metal temperature</i>	<i>Circuit metal temperature</i>	<i>Circuit metal temperature</i>
<i>Temperature at surface (cold runner)</i>	<i>Temperature at surface (cold runner)</i>	<i>Temperature, part</i>
<i>Time to Freeze (part and runner)</i>	<i>Time to Freeze (part and runner)</i>	<i>Time to freeze, part and runner</i>
<i>Maximum temperature (part and runner)</i>	<i>Maximum temperature (part and runner)</i>	<i>Percentage frozen layer</i>
<i>Average temperature (part & runner)</i>	<i>Average temperature (part & runner)</i>	<i>Percentage molten layer</i>
<i>Maximum temperature position, part</i>	<i>Maximum temperature position, part</i>	

Hasil Analisa Pendinginan		
<i>Midplane</i>	<i>Dual-Domain</i>	<i>3D</i>
<i>Percentage frozen layer (top), part</i>	<i>Percentage frozen layer (top), part</i>	
<i>Temperature profile, part & runner</i>	<i>Temperature profile, part & runner</i>	
<i>Circuit heat removal efficiency</i>	<i>Circuit heat removal efficiency</i>	<i>Circuit heat removal efficiency</i>
<i>Temperature, mold (top & bottom)</i>	<i>Temperature, mold & part</i>	<i>Temperature, mold</i>
<i>Flux, part (Top & Bottom)</i>	<i>Flux, part</i>	
<i>Temperature, part (Top & Bottom)</i>		
<i>Temperature difference, part</i>		

E. Analisa Warpage

Analisis *warpage* memungkinkan pengguna untuk memahami penyebab penyusutan dan deformasi pada proses injeksi saat produk plastik dihasilkan serta memprediksi di mana deformasi akan terjadi selanjutnya. Hasil dari analisa ini memungkinkan pengguna untuk mengoptimalkan desain, bahan, dan parameter pengolahan untuk mengontrol bagian yang diperkirakan mengalami deformasi sebelum cetakan dibuat. Dengan analisa ini akan didapatkan produk dengan stabilitas ukuran yang baik, penampilan visual yang baik, dan akurasi bentuk yang baik.

F. Analisa Tegangan

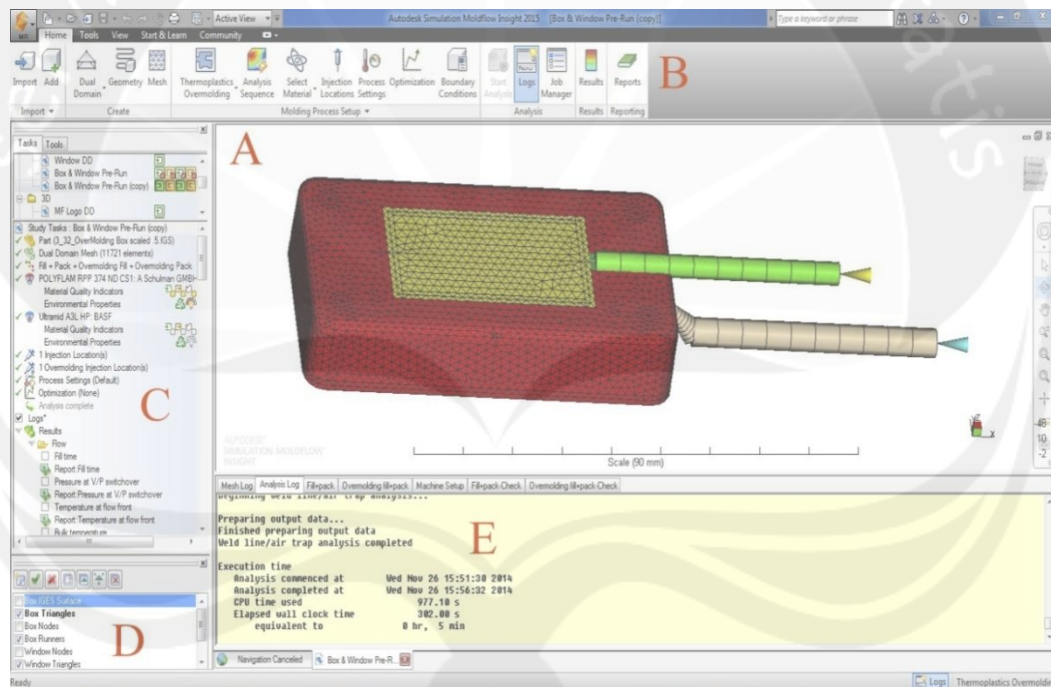
Analisis struktural berfungsi untuk memprediksi tegangan sisa yang terjadi pada produk yang dihasilkan dari proses injeksi. Perubahan struktur terjadi seiring dengan proses injeksi, hal ini diakibatkan karena adanya proses pemanasan

plastik. Perubahan struktur karena proses pemanasan menyebabkan produk plastik yang dihasilkan memiliki tegangan dalam dan tegangan sisa. MPI dapat digunakan untuk menganalisa tegangan yang terjadi, sehingga biaya untuk percobaan dapat direduksi dan desain produk menjadi lebih optimal.

2.2.6. Kofigurasi Panel Operasional Perangkat Lunak MPI

Konfigurasi panel MPI terdiri dari lima bagian utama, yaitu:

- Panel Model
- Panel *Tool*
- Panel Proses
- Panel *Layer*
- Panel *Log*



Gambar 2.6. Panel Utama MPI

(Tutorial Moldflow Plastic Insight 2015, Autodesk, 2015)

2.2.7. Pengertian Plastik dalam Desain Plastik *Molding*

Plastik ialah salah satu bahan baku yang diperoleh melalui proses sistesis dari berbagai bahan mentah, yaitu: minyak bumi, gas bumi dan batu bara. Plastik juga dapat dinamakan bahan organik karena terdiri dari persenyawaan karbon,

kecuali plastik silikon. Plastik disebut sebagai bahan berstruktur makro molekuler karena bahan tersebut terdiri dari molekul-molekul yang besar.

Jenis plastik pada dasarnya ada tiga jenis, yaitu:

a. *Thermoplast*

Jenis plastik ini mempunyai susunan molekul benang ruwet dan tanpa ikatan. Molekul-molekul makro bersatu karena adanya gaya yang berasal dari gesekan dan belitan antar molekul. Plastik semacam ini sangat mudah mengalami deformasi.

b. *Duroplast*

Jenis plastik ini terdiri dari molekul makro yang membentuk susunan jala yang rapat. Susunan tersebut terbentuk karena gaya sambung kimiawi tetapi apabila mengalami kenaikan temperature akan mengecil.

c. *Elastomer*

Jenis plastik ini terdiri dari molekul makro yang membentuk susunan jala yang renggang. Susunan tersebut terbentuk karena gaya fisik seperti gaya gesek dan belitan serta gaya sambung kimiawi yang terdapat pada ikatan-ikatan antara dua molekul makro.

2.2.8. Pengertian *Mold* Plastik (*Plastic Molding*)

Secara umum pengertian *mold* plastik adalah proses pembentukan suatu benda atau produk dari material plastik dengan bentuk dan ukuran tertentu yang mendapat perlakuan panas dan pemberian tekanan dengan menggunakan alat bantu berupa cetakan atau *mold*. *Mold* plastik pada prinsipnya adalah suatu alat (*tool*) yang digunakan untuk membuat komponen-komponen dari material plastik dengan sarana mesin cetak plastik.

Faktor yang berpengaruh selain pemilihan material dalam mendapatkan produk yang sesuai dengan sifat yang diinginkan dari suatu bentuk desain produk adalah luas penampang, ketebalan, insert yang panjang, dan tuntutan ukuran (toleransi). Berdasar material plastik yang digunakan, *mold* plastik dapat dibedakan atas beberapa jenis, yaitu:

a. *Blowing molding*

b. *Compression molding*

c. *Extrusion molding*

d. *Transfer molding*

e. *Injection molding*

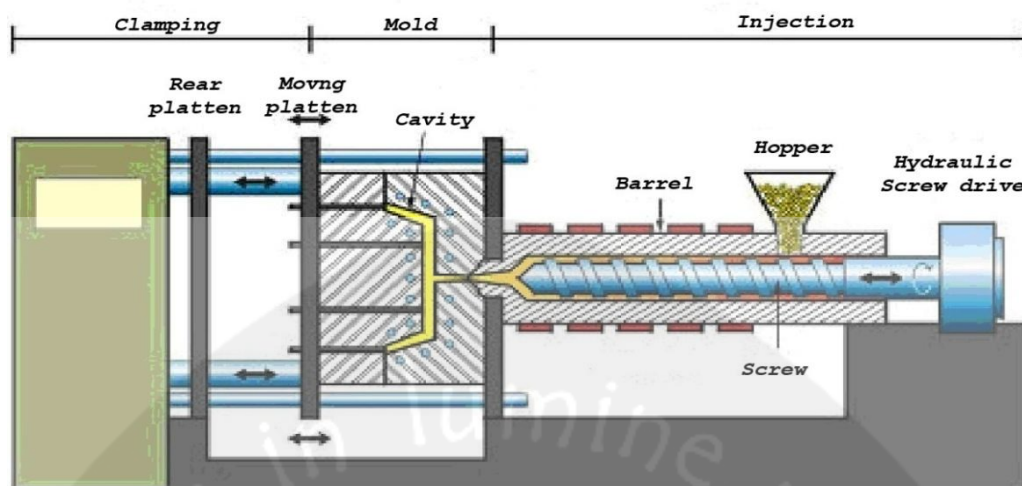
2.2.9. Prinsip Umum Desain *Mold*

Dalam desain cetakan, ada beberapa aturan yang harus perhatian. Aturan tersebut antara lain: (1) Gunakan ketebalan dinding seragam di seluruh bagian. Tebal dinding yang seragam akan meminimalkan penyusutan, bengkok, tegangan sisa, dan meningkatkan efisiensi proses pengisian cetakan dan waktu siklus. (2) Gunakan profil radius pada semua ujung produk. Dimensi radius sudut di dalam minimal satu kali ketebalan material. (3) Pilih ketebalan produk sesuai dengan persyaratan proses, material, atau desain produk. Pemilihan ketebalan dinding yang tepat menunjang waktu pendinginan yang relatif lebih cepat dan waktu siklus pendek. Semua hasil ini dapat menghasilkan biaya produksi relatif lebih rendah. (4) Gunakan penguat berupa *rib* untuk meningkatkan kekakuan pada bagian lentur. Hal ini untuk menghindari penggunaan ketebalan berlebih pada bagian produk, sehingga dapat menghemat berat total, biaya material, dan biaya waktu siklus.

2.2.10. Metode *Injection Molding*

Metode *injection molding* merupakan proses pembentukan benda kerja dari material *compound* berbentuk butiran yang di tempatkan kedalam suatu *hopper* dan masuk ke dalam silinder injeksi yang kemudian didorong melalui *nozzle* dan *sprue bushing* kedalam *cavity* dari *mold* yang sudah tertutup. Setelah beberapa saat didinginkan, *mold* akan dibuka dan benda jadi akan dikeluarkan dengan bantuan *ejector*. Material yang sangat sesuai adalah material *thermoplast*. Material ini akan melunak karena pemanasan dan sebaliknya akan mengeras lagi bila didinginkan. Perubahan material ini hanya bersifat fisik bukan perubahan kimiawi sehingga memungkinkan untuk mendaur ulang material sesuai dengan kebutuhan.

Material plastik yang dipindahkan dari silinder pemanas, suhunya berkisar antara 117 °C sampai 274 °C atau sesuai rekomendasi dari manufaktur pembuat material plastik. Semakin panas suhunya, material akan semakin encer (rendah viskositasnya) sehingga semakin mudah diinjeksi ke dalam *mold*. Setiap material memiliki karakter suhu *molding* (*mold flow index*). Semakin lunak formulasinya, yang berarti kandungan plastis tinggi sehingga membutuhkan temperatur yang rendah, dan sebaliknya semakin keras formulasinya membutuhkan temperatur tinggi.



Gambar 2.7. Bagian mesin *injection molding*
(How to Make Injection Molds, Menges, 2001)

Mesin *injection mold* dapat dibagi menjadi tiga bagian besar, yaitu:

a. *Injection Unit*

Injection unit terdiri dari beberapa bagian dengan fungsi tertentu yang fungsi utamanya adalah menyediakan dan mengalirkan material proses injeksi ke dalam *mold*. Di dalam *injection unit* terjadi perubahan bentuk material dari padat menjadi cair. Hal ini agar material dapat dibentuk sesuai dengan konstruksi *mold* yang digunakan.

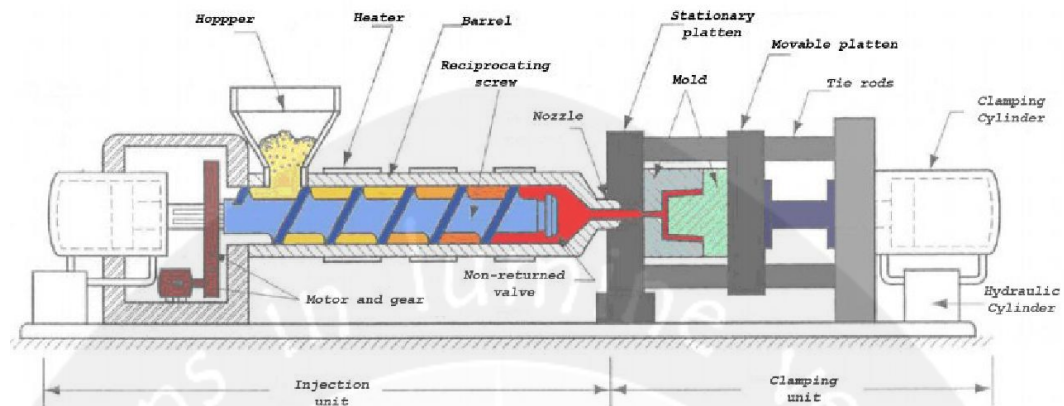
b. *Mold Unit*

Mold unit adalah bagian lain dari mesin *plastic injection*, *molding unit* adalah bagian yang membentuk benda yang dibuat, secara garis besar *molding unit* memiliki 2 bagian utama yaitu bagian *cavity* dan *core*, bagian *cavity* adalah bagian cetakan yang berhubungan dengan *nozzle* pada mesin, sedangkan bagian *core* adalah bagian yang berhubungan dengan *ejector*.

c. *Clamping Unit*

Clamping unit berfungsi untuk memegang dan mengatur gerakan dari *mold unit*, serta gerakan *ejector* saat melepas benda dari *molding unit*. Pada *clamping unit* kita bisa mengatur berapa panjang gerakan *molding* saat di buka dan berapa panjang *ejector* harus bergerak.

2.2.11. Injection Unit



Gambar 2.8. Bagian Detail Plastik Injection Machine
(How to Make Injection Molds, Menges, 2001)

Mesin *Plastic Injection* terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

a. Motor dan *Transmission Gear Unit*

Bagian ini berfungsi untuk menghasilkan daya yang digunakan untuk memutar *screw* pada *barrel*, sedangkan *transmission unit* berfungsi untuk memindahkan daya dari putaran motor ke dalam *screw*, selain itu *transmission unit* juga berfungsi untuk mengatur tenaga yang disalurkan sehingga tidak terjadi pembebanan yang terlalu besar.

b. *Cylinder Screw Ram*

Bagian ini berfungsi untuk mempermudah gerakan *screw* dengan menggunakan momen *enersia* sekaligus menjaga perputaran *screw* tetap konstan, sehingga dapat dihasilkan kecepatan dan tekanan yang konstan saat proses injeksi plastik dilakukan.

c. *Hopper*

Merupakan tempat untuk menempatkan material plastik, sebelum masuk ke *barrel*, biasanya untuk menjaga kelembapan material plastik, digunakan tempat penyimpanan khusus yang dapat mengatur kelembapan, sebab apabila kandungan air terlalu besar pada udara, dapat menyebabkan hasil injeksi yang tidak bagus.

d. *Barrel*

Merupakan tempat *screw*, dan selubung yang menjaga aliran plastik ketika dipanasi oleh *heater*, pada bagian ini juga terdapat *heater* untuk memanaskan plastik sebelum masuk ke *nozzle*.

e. *Screw*

Reciprocating screw berfungsi untuk mengalirkan plastik dari *hopper* ke *nozzle*. Material dari *hopper* akan tertarik mengisi *screw* ketika *screw* berputar dan selanjutnya dipanasi lalu didorong ke arah *nozzle*.

f. *Nonreturn valve*

Valve ini berfungsi untuk menjaga aliran plastik yang telah meleleh agar tidak kembali saat *screw* berhenti berputar

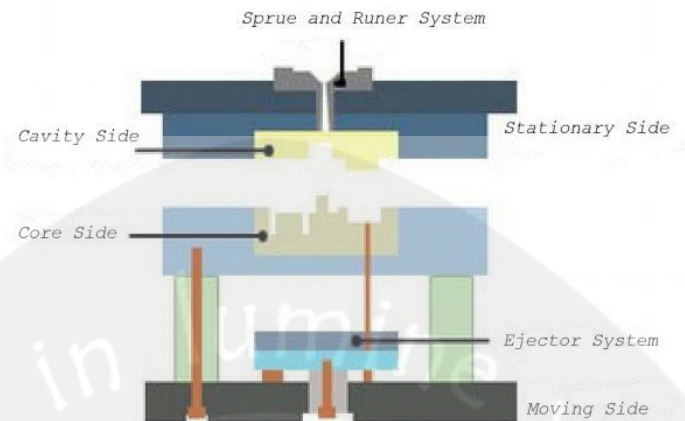
2.2.12. Molding Unit

Molding unit adalah bagian yang membentuk benda yang dibuat, secara garis besar *molding unit* memiliki 2 bagian utama yaitu bagian *cavity* dan *core*, bagian *cavity* adalah bagian cetakan yang berhubungan dengan *nozzle* pada mesin, sedangkan bagian *core* adalah bagian yang berhubungan dengan *ejector*. Selain 2 bagian utama tersebut, terdapat juga bagian-bagian lain yang saling berhubungan dengan *cavity* dan *core*, sehingga terjadi sistem *mold* yang kompleks.

Pembuatan *mold* injeksi membutuhkan *tooling cost* atau biaya peralatan yang tinggi namun memiliki *cycle time* atau waktu produksi yang lebih cepat dibanding dengan proses yang lainnya. Dengan pertimbangan waktu produksi yang cepat maka biaya tiap bagiannya dapat ditekan untuk menjadi lebih murah apalagi jika berjalan secara otomatis. *Molding unit* memiliki banyak bagian yang menjadi suatu sistem *mold* injeksi.

a. *Standard Mold*

Standard mold adalah tipe *mold* dasar yang merupakan jenis minimum untuk membuat *mold* injeksi untuk plastik.



Gambar 2.9. Standard Mold
(Injection molds: 130 proven designs, Gastrow, 2006)

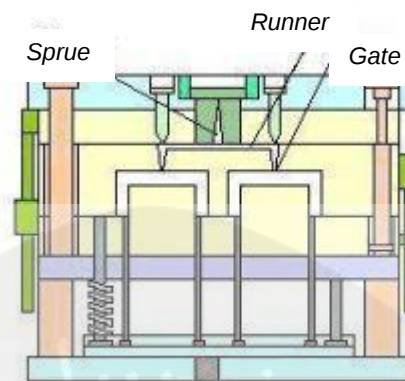
Karakteristik dari *standard mold* antara lain adalah:

- i. *Stationary side* (minimal satu plat) biasa di sebut *cavity side*, bagian ini adalah bagian yang diam ketika proses injeksi dilakukan, pada bagian ini terdapat *sprue*, yaitu bagian yang bertemu dengan *nozzle* mesin injeksi, bagian inilah yang menerima aliran material cair pertama kali.
- ii. *Moving plate*, bagian yang bergerak ini minimal terdiri dari, *core side* yaitu kebalikan dari *cavity side*, bagian ini adalah bagian yang membentuk produk bagian *core*, pada bagian ini terdapat *ejector* yang berfungsi untuk menekan produk dari *mold* sehingga produk dapat keluar dari *mold* setelah proses injeksi dilakukan.

b. *Runners*

Runners berfungsi sebagai saluran tempat mengalirnya material menuju *core* dan *cavity* . Permukaan yang lebih besar akan menyebabkan pelepasan panas yang makin besar.

Cairan material mengalir dari *sprue bush* dan masuk ke dalam *cavity*, besar atau kecil maupun bentuk produk tergantung dari jenis material yang digunakan. Dari pergerakan material, *runner* bisa dibuat besar tetapi kalau *runner* besar maka *cooling time*-nya akan lama. Untuk itu, *runner* dibuat terlebih dulu lebih kecil dari produk, lalu sedikit demi sedikit dibuat lebih besar sampai pada ukuran yang sesuai. Harus diingat, besar *runner* tidak boleh lebih besar dari ketebalan produk.

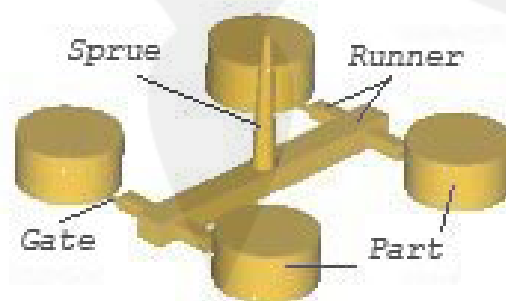


Gambar 2.10. Runner system
(Mold Dictionary, IMDIA, 2006)

c. *Gate*

Merupakan pintu masuk untuk leburan material yang mengalir dari *runner* ke *inside mold*. Fungsinya untuk mengontrol aliran cairan material maupun kondisinya, penempatan *gate* yang benar adalah yang paling dekat dengan dinding *product* yang paling tebal. Selain itu, fungsinya adalah untuk memudahkan dalam melakukan pemotongan (*cutting*) bagian *runner* yang tidak dipakai. Kalau *gate* terlalu kecil, mudah menyebabkan terjadinya *sink mark*, sebaliknya kalau terlalu besar menyebabkan mudahnya terjadi penumpukan gas.

Gate memegang peranan penting dalam proses *injection molding* karena dapat menentukan jadi atau tidaknya produk yang dibuat.



Gambar 2.11. Contoh Gate
(Mold Dictionary, IMDIA, 2006)

2.2.13. Cacat Produksi Pada Proses Injeksi Plastik

A. Penyusutan (*Shrinkage*)

Pada setiap pembuatan *mold* harus diperhitungkan akan adanya penyusutan material setelah produk plastik membeku dan keluar dari rongga cetakannya. Hal ini terjadi karena ada perubahan fase dari material cair menjadi material padat, pasti akan mengalami perubahan volume. Jadi bila dibandingkan dengan ukuran pada *mold*, maka ukuran produknya akan berbeda, yaitu ukuran luar benda kerja akan lebih kecil dibanding rongga cavitynya.

Penyusutan material (*shrinkage*) dinyatakan dalam persen, sehingga jika dirumuskan:

$$shrinkage = \frac{\Delta L}{L} (\%) \quad (2.1)$$

Arah penyusutan material adalah menuju ke sebuah titik referensi didalam benda kerja, artinya tidak boleh mengambil bidang atau garis yang ada didalam benda kerja. Untuk mengendalikan *shrinkage* pada perhitungan pembuatan *cavity* atau dalam proses produksi, dibutuhkan suatu faktor yang dikalikan dengan ukuran pada produk tersebut jika besarnya *shrinkage* dari suatu material plastik diketahui.

$$\text{Faktor Shrinkage (f)} = (1 + \Delta L) \quad (2.2)$$

Contoh :

Dari Tabel *shrinkage* untuk material PS (*polystyrene*) = 0,4 - 0,6%, maka perhitungan faktornya adalah $f = (1+0,5\%) = 1,005$

Untuk lebih jelasnya dapat digambarkan bila kita membuat produk dari material PS dengan ukuran luar 38 x 52 x 3,5 mm yang mempunyai dua lubang diameter 6 mm dan jaraknya 26 mm, maka ukuran pada *mold* yang direncanakan adalah :

Ukuran *cavity* = 38,190 x 52,260 x 3,518 mm

Ukuran *Core* = 6,030 mm

Jarak *Core* = 26,130 mm

Dalam perhitungan faktor *shrinkage* diatas mengambil harga *shrinkage* rata-rata yaitu 0,5% dari tabel dengan pertimbangan bahwa kondisi *mold* optimal.

Tabel 2.4 Daftar *Shrinkage* material plastik
(*Practical Guide to Injection Moulding*, Goodship, 2004)

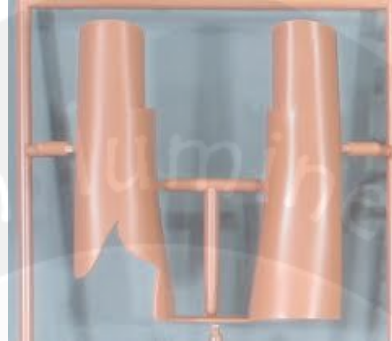
Material Plastik	Shrinkage (%)
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	0,4 - 0,7
Polystyrene (PS)	0,4 - 0,6
Nylon (PA)	1,0 - 2,5
Acrylic (PMMA)	0,4 - 0,8
Polycarbonate (PC)	0,6 - 0,8
Polyacetal (POM)	1,5 - 2,5
Polypropylene (PP)	1,0 - 2,0
Low Density Polyethylene (LDPE)	1,5 - 3,0
High Density Polyethylene (HDPE)	1,5 - 3,0
Poly Vinyl Chloride (PVC)	0,1 - 0,2

Namun pada *mold* yang mempunyai bentuk tidak sederhana, ukuran-ukuran yang ekstrim misalnya panjang dan tipis, atau mempunyai banyak perbedaan ketebalan dengan adanya bulatan atau tonjolan untuk tempat ulir dan sebagainya, maka penentuan faktor ini akan lebih sukar. Pada kasus semacam ini, dikenal adanya istilah penyusutan kearah memanjang (*longitudinal shrinkage*) maupun melintang (*transversal shrinkage*) terhadap benda kerjanya, sehingga perhitungannya menjadi semakin kompleks. Kadang-kadang bahkan sering terjadi hal-hal yang tidak bisa diprediksi lebih dahulu, misalnya suatu bentuk yang simetris namun ternyata menghasilkan penyusutan yang berbeda. Setelah diamati lebih teliti ternyata perbedaan penyusutan ini disebabkan oleh kurang sempurnanya pendinginan *mold* (*cooling*).

Faktor lain yang bisa mempengaruhi besarnya penyusutan adalah jumlah dan penempatan *gate*, ada tidaknya rib penguat pada benda kerja, besarnya tekanan injeksi dan tekanan penahan injeksi (*holding pressure*), penguat material (*reinforcement*) serta masih banyak faktor lainnya. Maka, untuk benda kerja yang mempunyai tuntutan kestabilan bentuk serta harus berpasangan (*matching*) dengan benda lainnya, sebaiknya dipilih bahan yang dalam daftar material mempunyai harga shrinkage yang kecil, sehingga perubahan ukuran tidak terlalu besar.

B. Short Shot

Short Shot adalah suatu kondisi dimana, plastik leleh yang akan diinjeksikan kedalam *cavity* tidak mencapai kapasitas yang ideal atau sesuai settingan mesin. Sehingga plastik yang diinjeksikan kedalam *cavity* mengeras terlebih dahulu sebelum memenuhi *cavity*.



Gambar. 2.12. Produk defect (*Short Shot*)
(Defect pada produk plastik, Tresno, 2010)

Penyebab cacat ini karena karakteristik viskositas dan fluiditas dari plastik. Desain gate dan keberadaan *venting* udara serta konstruksi bushing juga dapat berpengaruh. Selain itu, performa dan kondisi *mold* serta mesin injeksi juga mempengaruhi terjadinya short shot.

C. Flashing (Flash)

Flashing adalah jenis minor *defect* pada material, artinya material masih bisa dikatakan bagus tetapi harus dilakukan pembersihan (*finishing*) pada produk. *Flashing* sendiri berarti terdapat material lebih yang ikut membeku di pinggir-pinggir produk.



Gambar. 2.13. Produk *Flashing*
(Defect pada produk plastik, Tresno, 2010)

Flashing terjadi karena kurangnya *pressure clamping* pada *mold* sehingga *mold* menjadi kurang rapat pada pertemuan antara dua *plate* dan pada saat injeksi material ada yang keluar lewat celah. Desain produk yang kurang sesuai dan kurangnya viskositas material juga dapat menyebabkan terjadinya *flashing*.

D. Sink-mark

Sink-mark merupakan cekungan atau lengkungan yang terjadi pada permukaan luar pada komponen yang dibentuk dan dapat juga berarti perbedaan ketebalan pada permukaan benda. *Sink-mark* bisa saja bukan termasuk *defect*, tetapi bila menyangkut pengaruh penampilan, *sink-mark* dapat diberlakukan sebagai *defect* pada produk yang memperhatikan kualitas penampilan. Fenomena ini sering menjadi masalah sebagai cacat tetapi masih tergantung pada kualitas produk. *Sink-mark* tergantung pada *shrinkage* material plastik itu sendiri.



**Gambar. 2.14. Produk *Sink-mark*
(Defect pada produk plastik, Tresno, 2010)**

Biasanya, perbedaan *temperature core* dan *cavity* serta *loading time* material yang terlalu cepat dapat menyebabkan *sink-mark*. *Temperature resin*, *temperature die*, *injection speed* yang terlalu tinggi atau rendah dan kurangnya kemampuan pendinginan dari *die* serta peningkatan suhu karena putaran *screw* terlalu cepat berpengaruh juga terhadap cacat ini

E. Flow-mark

Kondisi *flow-mark* digunakan untuk menggambarkan fenomena dimana terdapat pola bergaris, terbentuk di sekitar *gate* pada saat material mengalir memasuki *cavity*. Dalam hal ini, plastik yang telah didinginkan *sprue* dan *runner* yang selanjutnya didinginkan oleh *cavity* dan mengisi dalam viskositas tinggi, akibatnya plastik yang kontak dengan permukaan *mold* bertekanan dalam

kondisi semi-padat dan garis-garis tegak lurus terhadap arah aliran material terbentuk pada permukaan produk yang dicetak.



Gambar. 2.15. Produk *Flow-mark*.
(Defect pada produk plastik, Tresno, 2010)

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi terjadinya *flow-mark*. Kecepatan alir material yang terlalu lambat atau kecepatan pendinginan yang terlalu cepat dapat menyebabkan *flow-mark* selain karena perubahan tekanan yang terjadi pada *mold*.

F. Colour Streaks

Fenomena *colour streaks* terjadi karena adanya dua campuran atau lebih warna pada suatu produk yang menyebabkan warna produk tersebut menjadi belang. Biasanya *colour streaks* terjadi sehabis pergantian material, dimana masih ada sisa-sisa material lama yang masih terperangkap di dalam manifold atau *nozzle*. Material yang tidak bercampur dengan baik pada saat proses *mixing* juga dapat menyebabkan *colour streaks*.

G. Bubbles

Bubbles dapat dibilang sebagai gelembung udara yang terperangkap dalam produk. Biasanya terjadi pada saat proses injeksi material kedalam *cavity* ketika udara tidak sempat keluar melalui *air venting*. Cacat ini juga dapat dipengaruhi oleh gas yang masih terperangkap dengan material cair dalam *cylinder*.

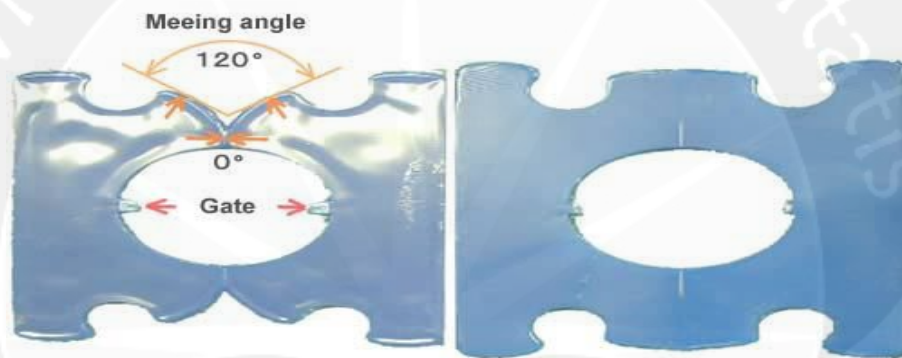
H. Jetting

Jetting adalah garis semburan di permukaan produk yang dimulai dari sisi *gate point* karena aliran turbulen material. Plastik yang dengan suhu relatif rendah diinjeksikan kedalam *nozzle* selama tahap awal *molding*, setelah bersentuhan dengan cetakan, material ini menjadi sangat kental dan terdorong terus kedalam cetakan yang akhirnya meninggalkan bekas aliran. Penyebabnya bisa karena

ukuran *gate* yang terlalu kecil sehingga *speed* material yang diinjeksikan menjadi cukup cepat atau temperatur material yang terlalu rendah dan viskositas material menjadi tinggi yang mengakibatkan resistensi terhadap material menjadi besar.

I. *Weld -line*

Weld-line terjadi ketika dua atau lebih aliran lelehan material yang bertemu dan membeku dengan tidak sempurna yang digambarkan dengan garis “V” sempit pada kedua ujung aliran lelehan material. Fenomena ini terjadi pada saat menggunakan sisipan atau *multi-point gate*. Secara teori, cacat ini tidak dapat dihilangkan tetapi hanya dapat diminimalisir atau dipindahkan. *Weld-line* kadang terlihat seperti *crack* dan kehadiran *weld-line* pada daerah konsentrasi tegangan dapat menyebabkan masalah kekuatan. *Weld-line* harus segera ditanggulangi.



Gambar. 2.16. Produk *Weld Line*
(Defect pada produk plastik, Tresno, 2010)

J. *Black Spot*

Black spot atau bintik hitam atau goresan pada permukaan produk terjadi karena kerusakan thermal. Adanya material sisa yang terjebak dalam heater atau kontaminasi produk oleh zat yang tidak diperlukan yang menyebabkan black spot. Kecepatan screw yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan degradasi material juga mempengaruhi cacat ini.

K. *Stringing*

Stringing adalah fenomena dimana bagian *string-line* pada plastik terbentuk pada saat *mold* open, kemudian sisa material yang tertarik tersebut terjebak didalam *mold* dan pada saat *shot* selanjutnya menyebabkan ketidakrataan hasil produk. Biasanya disebabkan oleh temperatur *nozzle* yang terlalu tinggi.

L. Warpage

Warpage atau *twisting* digunakan untuk menjelaskan bagian dari produk yang bengkok atau melengkung karena ketidakrataan distribusi tekanan pada produk. Faktor yang menyebabkan *warpage* adalah perbedaan antara *shrinkage* dan *cooling time* yang tergantung pada kontraksi kedua permukaan dan ketebalan komponen dari hasil distribusi temperatur *mold*. Bisa jadi karena *injection pressure* yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dan *cooling* terlalu pendek dan kurangnya *clamping force* dapat menyebabkan *warpage*.

2.2.14. Metode Taguchi

Metode Taguchi dicetuskan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1949 saat mendapatkan tugas untuk memperbaiki sistem telekomunikasi di Jepang. Metode ini bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta dapat menekan biaya dan resources seminimal mungkin. Metode Taguchi sering disebut *robust design* karena menjadikan produk *robust* (kokoh) terhadap noise.

Definisi kualitas menurut Taguchi adalah kerugian yang diterima oleh masyarakat sejak produk tersebut dikirimkan. Oleh karena itu, kualitas harus didesain ke dalam produk bukan sekedar memeriksanya dan kualitas terbaik dicapai dengan meminimalkan deviasi dari target. Produk harus didesain sehingga kokoh terhadap faktor lingkungan yang tidak dapat dikontrol. Biaya kualitas harus diukur sebagai fungsi deviasi dari standar tertentu dan kerugian harus diukur pada sebuah sistem.

Metode Taguchi merupakan pengendalian kualitas yang preventif, sebagai desain produk atau proses sebelum sampai pada produksi di tingkat *shop floor*. Oleh karena itu, metode Taguchi dilakukan pada saat awal dalam *life cycle product* yaitu perbaikan pada awal untuk menghasilkan produk (*to get right first time*). Tujuan dari fungsi Taguchi (*loss function*) adalah untuk mengevaluasi kerugian kualitas secara kuantitatif yang disebabkan adanya variasi (Bellavendram, 1995). Menurut Bellavendram (1995), aktivitas quality control (QC) terbagi menjadi dua, yaitu:

A. Off-line QC

Off-Line QC merupakan aktivitas pengendalian kualitas di dalam proses dan pembuatan desain produk sebelum diproses manufaktur. Pada dasarnya merupakan tindakan pencegahan supaya proses manufaktur yang akan berjalan menghasilkan produk cacat yang minimum. Pengendalian kualitasnya dilakukan

sebelum proses produksi berlangsung. Aktivitas *off-line QC* sangat mendukung dalam aktivitas *on-line QC* karena dapat mengoptimalkan desain produk dan proses. Tiga tahap pada desain proses tersebut adalah:

i. *System Design*

System design merupakan tahap awal berkaitan dengan pengembangan teknologi. Pada tahap ini dibutuhkan pengetahuan teknis yang luas untuk menilai dalam pengembangan produk atau proses.

ii. *Parameter Design*

Parameter design merupakan tahap kedua dimana berkaitan dengan penekanan biaya dan peningkatan kualitas dengan menggunakan metode perancangan eksperimen yang efektif. Pada tahap ini akan ditentukan nilai-nilai parameter yang kurang sensitif terhadap *noise* lalu akan dicari kombinasi level parameter yang nantinya dapat menggunakan *noise*.

iii. *Tolerance Design*

Tolerance design adalah tahap dimana akan dilakukan pengendalian faktor-faktor yang mempengaruhi nilai target dengan menggunakan komponen yang bermutu tinggi dan biaya yang tinggi.

B. On-Line QC

On-line QC adalah aktivitas pengendalian kualitas pada saat proses manufaktur. Pada aktivitas *on-line QC* biasanya digunakan *Statistical Process Control (SPC)* dimana tindakan perbaikan akan dilakukan apabila pada saat produksi dihasilkan produk cacat yang tidak memenuhi spesifikasi. Pada dasarnya *on-line QC* merupakan tindakan pengendalian kualitas yang setelah proses produksi berlangsung.

2.2.15. Karakteristik Kualitas Menurut Taguchi

Karakteristik kualitas (*variable respons*) adalah suatu ketentuan obyek yang diharapkan dari suatu produk atau proses. Secara umum setiap karakteristik kualitas memiliki suatu target. Ada tiga karakteristik kualitas yang dikelompokkan berdasarkan nilai targetnya, yaitu (Bellavendram, 1995):

a. *Nominal Is The Best*

Karakteristik *Nominal Is The Best* adalah pengukuran karakteristik dengan nilai target yang spesifik yang ditentukan oleh pengguna (*user-defined*).

b. *Smaller Is Better*

Karakteristik *Smaller Is Better* adalah pengukuran karakteristik yang *non-negative* dimana target idealnya adalah nol.

c. *Larger Is Better*

Karakteristik *Larger Is Better* adalah pengukuran karakteristik yang *non-negative* dimana target idealnya adalah tak terbatas.

2.2.16. *Orthogonal Array* dan Matrik Eksperimen

Orthogonal array adalah suatu matrik yang elemen-elemennya disusun menurut baris dan kolom. Kolom merupakan faktor atau kondisi yang dapat diubah dalam eksperimen. Baris merupakan keadaan dari faktor. *Array* disebut *Orthogonal* karena level-level dari faktor berimbang dan dapat dipisahkan dari faktor yang lain dalam eksperimen. Maka, *orthogonal array* sebagai matrik seimbang dari faktor dan level yang sedemikian rupa sehingga pengaruh suatu faktor atau level tidak baur (*counfounded*) dengan pengaruh faktor atau level yang lain.

Matrik Eksperimen adalah matrik yang memuat sekelompok eksperimen dimana faktor dan level dapat ditukar sesama matrik. Melakukan eksperimen dengan menggunakan bentuk matrik khusus (*orthogonal array*) bertujuan agar dapat dilakukan pengujian terhadap pengaruh beberapa paramater secara efisien dan merupakan teknik penting dalam perancangan yang kokoh (*robust desain*).

Orthogonal array digambarkan seperti gambar dibawah ini:

$L_9(3^4)$

Orthogonal Array $L_9(3^4)$ diartikan sebagai *orthogonal array* yang mempunyai 4 faktor dengan 3 level dan eksperimen dilakukan sebanyak 9 kali.

Uraian untuk notasi diatas adalah:

- Notasi L, merupakan informasi yang ber.dasarkan pada penyusunan faktor *latin square*. Penyusunan *latin square* adalah penyusunan *square* matriks dengan pemisahan faktor-faktor yang berpengaruh. Sehingga notasi L menggambarkan informasi *orthogonal array*.
- Jumlah baris, merupakan jumlah eksperimen yang dibutuhkan pada saat menggunakan *orthogonal array*.
- Jumlah kolom, merupakan jumlah faktor yang dapat dipelajari dalam *orthogonal array* yang dipilih.
- Jumlah level, merupakan jumlah level dari faktor faktor yang digunakan dalam eksperimen.

Bentuk standar *orthogonal array* dari Taguchi dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.5. Orthogonal array standard dari Taguchi
(*Quality by Design: Taguchi Techniques for Industrial Experimentation*,
Bellavendram, 1995)

2 level	3 level	4 level	5 level	Level gabungan
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^5)$	$L_{23}(5^6)$	$L_{18}(2^1 \times 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$	-	$L_{32}(2^1 \times 4^9)$
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(3^{40})$	-	-	$L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$	-	-	-	$L_{36}(2^3 \times 3^{13})$
$L_{32}(2^{31})$		-	-	$L_{54}(2^1 \times 3^{25})$