

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Tinjauan Pustaka berisi uraian sistematis tentang informasi hasil-hasil penelitian yang pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang relevan dengan penelitian yang dilakukan. Penelitian terdahulu dapat dijadikan acuan penelitian yang dikerjakan agar bisa menyempurnakan atau mengembangkan penelitian terdahulu. Bagian ini juga memuat landasan teori berupa rangkuman teori-teori yang diambil dari pustaka yang mendukung penelitian, serta memuat penjelasan tentang konsep dan prinsip dasar yang diperlukan untuk pemecahan permasalahan.

2.1.1. Penelitian Pendahulu

Menurut Wei Guo dkk (2012) dalam *Journal of Mechanical Science and Technology* berjudul “*Prediction of warpage in plastic injection molding based on design of experiments*”, dengan *design of experiment* (DOE) dan software CAE *Moldflow* prediksi warpage bisa diketahui dengan tepat. Penelitian pada roduk *automobile housing trim* menggunakan lima parameter berpengaruh yaitu *melt temperature, coolant temperature, injection time, V/P switch over* dan *mold temperature* yang dikombinasikan dalam 30 eksperimen menggunakan metode Taguchi.

Xiaoxin Wang, dkk. (2012) dalam jurnal *Materials and Design* berjudul “*Research on the reduction of sink marks and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process*”, meneliti tentang metode *Rapid Heat Cycle Molding* (RHCM) untuk meningkatkan kualitas produk plastik tanpa menaikkan *molding cycle* dengan metode Taguchi. Permasalahan cacat produk seperti *flow mark, silver mark, jetting mark, weld mark, exposed fibers, short shot* bisa diatasi dengan metode ini. Cacat *sink marks* dan *warpage* dari produk plastik dianalisis dengan RHCM. Metode Taguchi berdasarkan desain eksperimental orthogonal, analisis *signal-to-noise* dan ANOVA digunakan untuk menyelidiki pengaruh parameter *molding* pada cacat *warpage*. Hasil yang diperoleh adalah semakin besar faktor *shrinkage* berakibat material plastik meleleh lebih cepat dan lebih dekat pada sisi

cavity dibandingkan dengan sisi *core*, hal ini yang menyebabkan cacat berupa *sink marks* dan *warpage*. Desain "*Bench Form*" mampu mengurangi cacat *sink marks* dari sisi luar. Semakin besar tekanan udara luar, semakin kecil *sink marks* yang terjadi dan parameter signifikan adalah *first-step packing time*, diikuti dengan *cooling time*, *first-step packing pressure*, *second-step packing time*, *melt temperature* dan *injection time*.

Yi-qi Wang, dkk. (2013) dalam jurnal *Material and Design* berjudul "*Optimization of plastic injection molding process parameters for manufacturing a brake booster valve body*" meneliti tentang optimalisasi proses *setting parameter plastic injection molding* menggunakan metode Taguchi. Beberapa hal penting dalam penelitiannya yang bisa dijadikan sebagai acuan adalah *plastic injection molding* terdiri dari 4 tahapan utama, yaitu *plastication*, *injection*, *packing*, dan *cooling*. Kualitas produk sangat tergantung pada banyak faktor, seperti material, *mold design*, dan parameter proses yang diaplikasikan pada proses pencetakan. Viskositas atau keenceran material plastik dan *curing percentage* (presentasi pendinginan) sangat mempengaruhi kualitas produk plastik, selain faktor yang lain seperti jumlah *gate*, ukuran *gate*, temperatur *molding*, temperatur resin, tekanan pengisian volume, tekanan pengisian, dan *curing time* (waktu pendinginan/pemulihan).

Marton Huszar, dkk (2015) dalam jurnal *Sustainable Material and Technologies* berjudul *Sustainable injection moulding: The impact of materials selection and gate location on part warpage and injection pressure* meneliti tentang pengaruh pemilihan material dan penempatan *gate* pada penurunan angka *warpage* dan tekanan injeksi. Material yang digunakan adalah *polypropylene*, *polystyrene* dan *fibre-filled polypropylene* yang diinjeksikan pada empat lokasi *gate* yang berbeda. Analisis dilakukan dengan menggunakan *software* CAE dan percobaan dengan material injeksi. Penelitian ini menunjukkan bahwa lokasi *gate* dan material sangat berpengaruh pada keseimbangan aliran material, *fill time* dan *cooling time* yang sangat berpengaruh pada *warpage*.

Wavare, dkk (2016) dalam *International Journal for Scientific Research & Development* berjudul *Investigation of Shrinkage and Warpage in the Plastic Injection Molding Process of PP MAS1110 by Autodesk Mold-Flow* menyimpulkan bahwa parameter-parameter seperti *injection pressure*, *holding pressure*, *melt temperature*, *holding pressure*, *injection time* dan *cooling time* mempengaruhi

volumetric shrinkage dan *warpage*. Penelitian tersebut menggunakan *software* CAE *Autodesk Moldflow* dengan metode Taguchi.

Penelusuran pustaka juga dilakukan oleh penulis pada laporan tugas akhir mahasiswa Program Studi Teknik Industri FTI-UAJY yang membahas tentang optimasi manufaktur dengan metode desain eksperimental. Berikut hasil penelusuran yang didapat:

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.

Seto (2015) dalam penelitiannya melakukan analisis *shrinkage* produk “*base plate*” menggunakan metode *Taguchi*. Untuk analisis dari produk tersebut menggunakan *software Moldflow Insight V5*. Penelitian ini memberikan informasi bagaimana cara mengurangi atau meminimalkan cacat produk atau *error* pada *setting* mesin untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Tito (2016) dalam penelitiannya melakukan analisis *warpage* pada produk *headpiece kit R67* dengan menggunakan metode Taguchi. Analisis menggunakan perpaduan antara *software Moldflow Adviser 2015* dengan *SolidWorks 2010*. 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*). *Output* penelitian ini berupa laporan hasil analisis *moldflow* dan parameter proses untuk meningkatkan kualitas produk.

Berdasarkan beberapa referensi pustaka diatas, akan didapatkan sebuah keterbaruan yaitu masih sedikitnya riset tentang optimasi parameter injeksi pada industri *mold* plastik di Indonesia maupun di Lembaga pendidikan.

2.1.2. Penelitian yang Sekarang

Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi atau meminimalkan cacat produk atau *error* pada *setting* mesin untuk mendapatkan hasil yang maksimal, dengan demikian cacat produk berupa *shrinkage*, *sink marks* dan *warpage* harus diminimalkan.

Penulis terdahulu seperti Penta (2009) , Wijaya (2010) dan Daksa (2012) melakukan penelitian dengan studi eksperimental Taguchi langsung di lapangan, sedangkan Wei Guo dkk (2012), X. Wang (2013), Yi-qi Wang (2014), Seto (2015) dan Tito (2016) telah melakukan studi eksperimental Taguchi dengan bantuan analisis *software* CAE. Pada tulisan ini mengambil studi kasus dari produk CT103 *Casing* P1-P2 yang diproduksi oleh unit produksi WI di PT. ATMI-IGI Center Surakarta yang menggunakan *mold two plate* dan *single cavity*.

Metode Taguchi digunakan untuk mencari parameter yang berpengaruh dan mencari hasil yang paling signifikan dengan membandingkan parameter prosesnya, sehingga diperoleh respon primer yang paling berpengaruh pada *weldline*, *sink marks* dan *warpage*. Tahap *orthogonal array* akan 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*).

CAE *moldflow dual-domain* adalah proses analisis proses injeksi plastik menggunakan *finith element* jenis *meshing dual-domain*. Produk dianalisis pada bagian struktur dengan membagi elemennya menjadi bagian-bagian segitiga yang lebih kecil yang disebut dengan *meshing*. Dalam tahap ini juga dicari *aspect ratio* yang paling baik agar proses injeksi optimal dan meminimalkan *error*.

Material plastik sudah ditentukan dari awal, dalam hal ini adalah *Polycarbonat* (PC). Lewat *molding window data material tadi* dapat digunakan sebagai pembanding dan pendekatan parameter untuk waktu injeksi, suhu *mold* dan suhu

leleh. *Runner system* dapat ditentukan pada produk, yang kemudian diikuti dengan lokasi *gate* dan desain *sprue*, *runner* serta *gate*.

Analisis injeksi (*filling*) menganalisis waktu injeksi dan memprediksi *weld-line* yang akan terjadi karena terlihat daerah yang kritis saat pengisian mold. Analisis *packing* dilakukan untuk menentukan pembekuan material yang seragam agar diperoleh *cycle time* yang lebih baik. Analisis *clamp force* dan tekanan *packing* dilakukan pada tahap ini menjamin bahwa *clamp force* lebih besar dari *injection force*. Hasil lain dari analisis ini adalah *air traps*, yaitu udara yang terjebak atau rongga yang terbentuk karena gelembung udara pada proses injeksi. Solusinya adalah pembuatan *air venting* atau penempatan *ejector* yang efektif membuang udara yang terjebak lokasi *air traps*.

Analisis *cooling* dilakukan untuk menentukan sistem pendingin (*cooling*) agar produk mengalami pendinginan yang efektif. Pendinginan yang tidak seragam mengakibatkan cacat berupa *warpage*. Analisis ini akan merekomendasikan apakah diperlukan lintasan pendingin di dalam *mold*, optimasi *cooling*, efisiensi pelepasan panas pada lintasan dan perbandingan suhu maksimal pada *cold runner* dan model.

Hasil dari semua analisis dirangkum dalam sebuah laporan *moldflow* yang akan menjadi panduan dalam membuat konstruksi *mold* dan menjadi pedoman dalam menentukan *setting* parameter pada mesin injeksi.

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Nama (Tahun)	Obyek Penelitian	Studi Kasus	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Software	Output Penelitian
Wei Guo dkk (2012)	<i>Automobile housing trim</i>	Wuhan University of Technology	Menentukan prediksi warpage berdasar metode <i>design of experiments</i> untuk mendapatkan <i>setting parameter</i> terbaik.	DOE Taguchi	UG <i>Moldflow</i>	<i>Setting parameter</i> optimal untuk meningkatkan kualitas <i>automobile housing trim</i> .
X. Wang dkk (2013)	<i>LCD TV front cell</i>	Shandong University, Jinan, Shandong	Mengaplikasikan metode <i>rapid heat cycle molding</i> dengan <i>design of experiments (DOE)</i> via <i>Taguchi methods</i> untuk mereduksi <i>warpage</i> dan <i>sink marks</i> .	ANOVA Taguchi	UG <i>Autodesk Moldflow Insight 2010</i>	<i>Setting parameter</i> optimal untuk menurunkan angka <i>warpage</i> dan <i>sink marks</i> .

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang (Lanjutan)

Nama (Tahun)	Obyek Penelitian	Studi Kasus	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Software	Output Penelitian
Yi Qi Wang dkk (2014)	<i>Brake booster valve body</i>	Changwon <i>National University,</i> Changwon	Menentukan parameter proses optimal pada injeksi plastik.	ANOVA Taguchi	<i>Minitab 14 Mold-Flow Plastics Insight v5.0</i>	<i>Setting parameter optimal untuk meningkatkan kualitas brake booster valve body.</i>
Marton Huszar dkk (2015)	Material <i>PP (polypropylene), PS (polystyrene)</i> dan <i>fibrefilled PP</i>	<i>College of Engineering, Swansea University,</i> Singleton Park, Swansea	Menentukan pengaruh pemilihan material dan lokasi gate pada <i>warpage</i> dan tekanan injeksi.	Numerical	<i>Moldflow Insights</i>	Material dan lokasi <i>gate</i> terbaik untuk mengurangi cacat <i>warpage</i> dan tekanan injeksi.
Penta (2009)	Genteng Super DD Hidrolik	UD. Karya Manunggal	Menentukan parameter yang mempengaruhi hasil kualitas genteng dan meminimalkan cacat produk	Taguchi	<i>Minitab Excel</i>	<i>Setting parameter optimal untuk meningkatkan kualitas genteng</i>

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang (Lanjutan)

Nama (Tahun)	Obyek Penelitian	Studi Kasus	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Software	Output Penelitian
Wijaya (2010)	<i>Material Thermoforming</i>	Lab. Proses Produksi ATMA JAYA	Menentukan parameter dan <i>setting level</i> untuk mesin <i>thermoforming</i>	Taguchi	<i>Minitab</i> <i>Excel</i>	<i>Setting</i> faktor optimal untuk mesin <i>thermoforming</i>
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>
Seto (2015)	<i>Base Plate</i> dengan proses injeksi plastik	PUTP dan <i>Work 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.

Tabel 2.1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang (Lanjutan)

Nama (Tahun)	Obyek Penelitian	Studi Kasus	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Software	Output Penelitian
Tito (2016)	<i>Headpiece kit R67</i> dengan proses injeksi plastik	Salah satu industri elektronik terbesar di Kota Kudus Provinsi Jawa Tengah Indonesia.	Menentukan parameter proses yang optimal pada injeksi plastik untuk meminimalkan cacat produk.	Taguchi Moldflow Adviser	<i>Minitab 14, Pro Engineer WF4, Moldflow Adviser 2015</i>	Laporan hasil analisis <i>moldflow</i> dan parameter proses untuk meningkatkan kualitas produk <i>Headpiece kit R67</i> .
Peneliti (2017)	CT103 Casing P1-P2 dengan proses injeksi plastik	PUTP dan Unit Produksi <i>Work Injection PT.</i> ATMI-IGI Center Surakarta	Menentukan parameter proses optimal pada injeksi plastik untuk minimasi <i>shrinkage, sink marks dan warpage.</i>	Taguchi <i>Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015 (dual-domain)</i>	<i>Minitab Excel Autocad SolidWorks 2015 Student Version</i>	Laporan hasil analisis <i>moldflow</i> dan parameter proses yang optimal pada injeksi plastik untuk meningkatkan kualitas.

2.2. Dasar Teori

Dasar teori digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dengan berdasar pada teori- teori yang ada untuk mendapatkan hasil penelitian yang optimal dan benar.

2.2.1. *Finith Element* (Metode Elemen Hingga)

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 analisis 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 yang 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. Saat ini 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 analisis:

1. Masalah struktur:
 - a. Analisis tegangan: pada struktur rangka, balok dan *frame*, pada struktur pelat berlubang, dsb.
 - b. Kejadian tekuk (*Buckling*): pada kolom dan *shell*.
 - c. Analisis getaran.
2. Pada masalah non-struktur:
 - a. Kejadian transfer panas (*heat transfer*).
 - b. Aliran fluida (*fluid flow*), termasuk aliran dalam media berpori (tanah).
 - c. Distribusi dari potensi magnetik atau elektrik.
3. 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 kontinu sebagian untuk mendeteksi kuantitas atau beberapa kuantitas yang tidak diketahui.

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

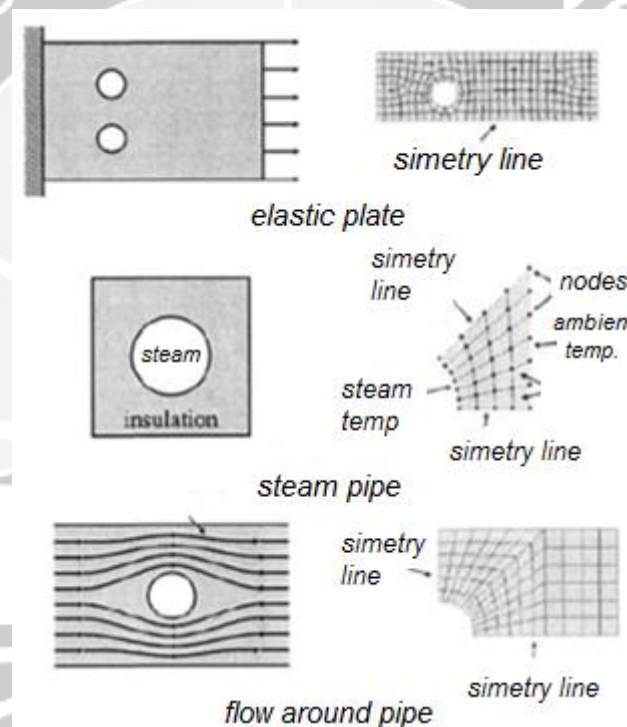
1. Mendiskritisasikan daerah-daerah yang meliputi penempatan titik-titik nodal, penomoran titik-titik nodal dan penentuan koordinatnya.
2. Menentukan derajat atau orde persamaan pendekatan linear atau kuadratik. Persamaan harus dinyatakan sebagai fungsi nodal.
3. Menyusun sistem persamaan-persamaan.
4. Menyelesaikan sistem persamaan-persamaan.
5. Menghitung kuantitas yang dicari. Kuantitas dapat merupakan komponen tegangan dan lain-lain.

2.2.2. Analisis Elemen Hingga

Elemen yang umum digunakan dalam analisis 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 lainnya 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:

1. *Processing Phase*

Membuat dan menentukan daerah yang akan diselesaikan menggunakan elemen hingga, kemudian menguraikan masalah menjadi nodal-nodal dan elemen-elemen. Bentuk fungsi untuk menggambarkan sifat fisik dari sebuah elemen merupakan pendekatan fungsi kontinyu 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.

2. *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.

3. *Postprocessing Phase*

Pada sesi ini akan didapatkan informasi penting lainnya, seperti nilai tegangan (*stress*) dalam analisis statik, distribusi kecepatan meknika fluida, distribusi temperatur dan lain-lain.

2.2.3. Prinsip Dasar *Software Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*

Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015 adalah perangkat lunak yang paling sering digunakan untuk memodelkan, menganalisis, mengoptimalkan desain produk plastik dan cetakannya. *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015* menyediakan beberapa paket yang dapat digunakan untuk pemodelan berbagai jenis proses injeksi plastik dengan berbagai jenis bahan plastik (*thermoplast* dan *termoset*). *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015* memungkinkan untuk menganalisis, 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 *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*

1. *Pre-Processing*

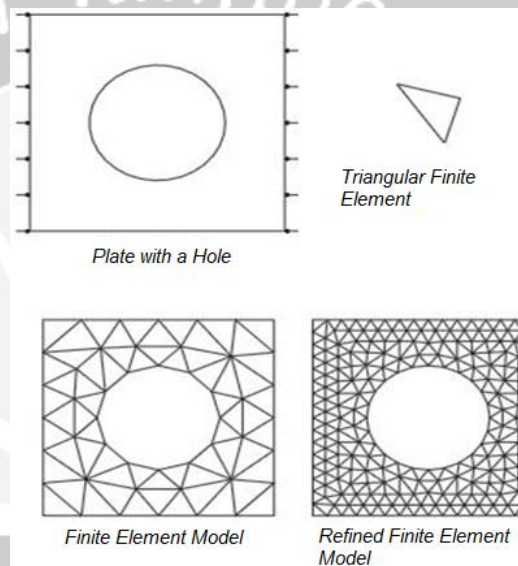
Persiapan untuk simulasi pekerjaan mulai dengan menggambar dimensi serta geometri model yang akan dianalisis. Biasanya, model ini sudah dibuat dalam *3D-CAD (model volume)*. Apabila dasar perhitungan hanya akan dilakukan pada permukaan model, maka model yang akan digunakan harus dikonversi menjadi model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

Model CAD yang ada (dibuat dengan SolidWorks, CATIA, Pro-E, dll) diimpor ke dalam perangkat lunak *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*.

Model dikonversi kedalam format yang *.STL atau *.IGS. Namun tidak menutup kemungkinan untuk membuat model langsung di *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*, tetapi hanya untuk model dengan bentuk dan dimensi yang sederhana.

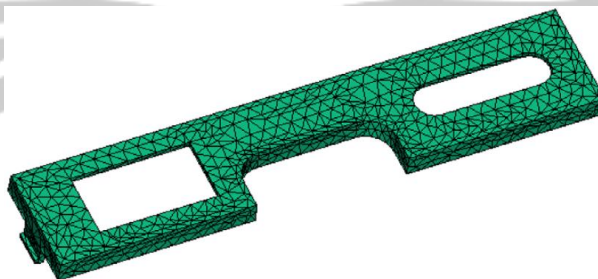
2. *Meshing*

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)



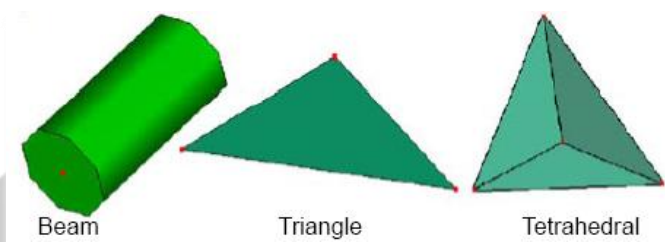
Gambar 2.3. Proses *Meshing* Produk 3D

(*Autodesk Moldflow Insight Performance*, Autodesk, 2010)

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

- a. *Beam*: terdiri dari dua nodal, biasa digunakan untuk memodelkan *runner*, saluran pendingin, dll.

- b. Segitiga: terdiri dari 3 nodal, biasa digunakan dalam memodelkan produk dan cetakan.
- c. *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)

3. Menentukan Jenis *Meshing*

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

a. *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. Analisis hasil pemodelan dengan metode *midplane* dapat dilakukan pada proses: pengisian, penahanan, pendinginan, *warpage* dan orientasi serat tambahan.

b. *Dual-Domain*

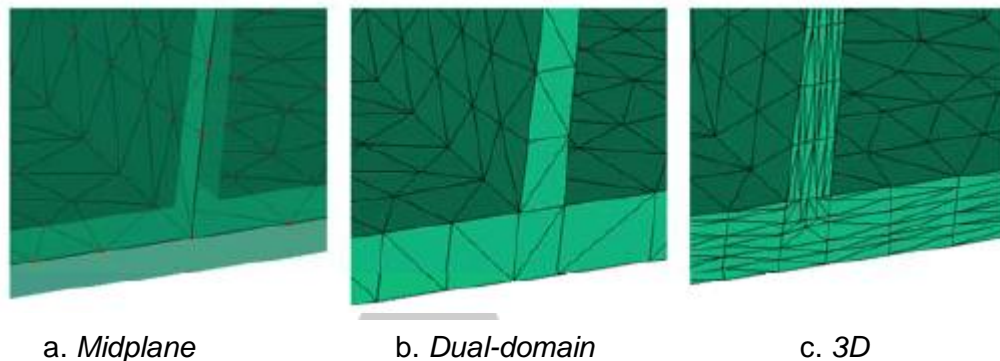
Proses *meshing* dengan metode ini memodelkan produk dengan gabungan permukaan model yang didefinisikan dengan segitiga yang telah ditetapkan sebagai element. Model dapat dideskripsikan sebagai sebuah benda berongga dengan permukaan kulit yang tertutup. Jarak antara kedua permukaan luar dari sistem dapat digunakan untuk mendefinisikan ketebalan dari model. Salah satu faktor penting penentu hasil pemodelan adalah kerapatan *meshing* yang diterapkan pada sistem.

Analisis hasil pemodelan dengan metode *dual-domain* dapat dilakukan pada proses: pengisian, penahanan, pendinginan, *warpage* dan orientasi serat tambahan.

Pemodelan dengan metode *meshing midplane* dan *dual-domain* memerlukan beberapa batasan asumsi awal untuk menyederhanakan pemodelan, antara lain: cairan plastik 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.

c. 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 sistem 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)

4. Menentukan Proses *Molding* yang akan Dimodelkan
Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015 memungkinkan digunakan untuk simulasi beberapa macam proses injeksi *molding*. Dalam penelitian ini menggunakan *thermoplastics injection molding*.

5. Memilih Urutan Analisis 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.

6. 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.

7. 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 *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*. Seringkali nilai ini hanya digunakan sebagai nilai awal, karena nilai-nilai tersebut akan berubah seiring dengan proses optimasi dan percobaan yang dilakukan.

8. Pemodelan *Runner System*

Runner system 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*, karena dari situlah dapat dihitung waktu yang diperlukan untuk mengalirkan material ke dalam *core*. Sebab dari hal ini bisa diminimalkan waktu pada saat produksi. Dengan bantuan *Moldflow* para *designer molding* dipermudah dalam mendesain. Ukuran panjang, lebar dan bentuk sebuah *runner* dapat disesuaikan dengan analisis terhadap produk yang akan dibuat.

9. Memulai Analisis

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

2.2.5. Jenis-jenis Analisis Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015

1. Analisis 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. Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015 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.

2. Analisis *Molding Window*

Analisis *molding window* digunakan untuk menghitung kondisi awal proses yang paling baik pada pemodelan. Analisis *molding window* dapat dengan cepat memberikan 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.

3. Analisis Aliran (*Flow*)

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

Tabel 2.2. Hasil Analisis Aliran

(Tutorial Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015, Autodesk, 2015)

Hasil Analisis 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>
<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>

Tabel 2.2. Hasil Analisis Aliran (Lanjutan)

Hasil Analisis Aliran		
Midplane	Dual-Domain	3D
<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>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>	
<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>	

Tabel 2.2. Hasil Analisis Aliran (Lanjutan)

Hasil Analisis Aliran		
Midplane	Dual-Domain	3D
<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>	

4. Analisis Pendinginan (Cooling)

Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015 menyediakan alat untuk pemodelan analisis rangkaian sistem pendingin pada cetakan yang digunakan untuk menganalisis efisiensi sistem pendinginan cetakan itu. Memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis 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 analisis pendinginan antara lain:

Tabel 2.3. Hasil Analisis Pendinginan

(*Tutorial Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015, Autodesk, 2015*)

Hasil Analisis Pendinginan		
Midplane	Dual-Domain	3D
<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>

Tabel 2.3. Hasil Analisis Pendinginan

Hasil Analisis Pendinginan		
<i>Midplane</i>	<i>Dual-Domain</i>	<i>3D</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>	
<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>		

5. Analisis Warpage

Analisis *warp* 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 analisis ini memungkinkan pengguna untuk mengoptimalkan desain, bahan, dan parameter pengolahan untuk mengontrol bagian yang diperkirakan mengalami deformasi sebelum cetakan dibuat. Dengan analisis ini akan didapatkan produk dengan stabilitas ukuran yang baik, penampilan visual yang baik, dan akurasi bentuk yang baik.

6. Analisis Tegangan

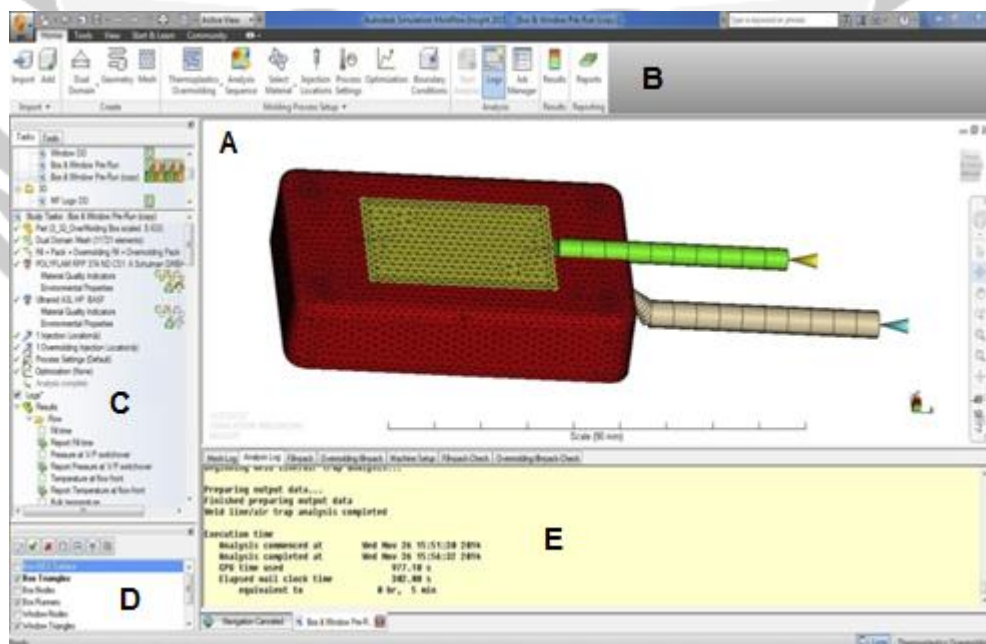
Analisis struktural berfungsi untuk memprediksi tegangan sisa yang terjadi pada produk yang dihasilkan dari proses injeksi. Perubahan struktur terjadi seiring dengan proses injeksi, hal ini diakibatkan karena adanya proses pemanasan plastik. Perubahan struktur karena proses pemanasan menyebabkan produk plastik yang dihasilkan memiliki tegangan dalam dan tegangan sisa. *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015* dapat digunakan untuk menganalisis tegangan yang terjadi, sehingga biaya untuk percobaan dapat direduksi dan desain produk menjadi lebih optimal.

2.2.6. Konfigurasi Panel Operasional Perangkat Lunak *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*

1. Konfigurasi panel *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*

Konfigurasi panel *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015* terdiri dari lima bagian utama, yaitu:

- a. Panel Model
- b. Panel *Tools*
- c. Panel Proses
- d. Panel *Layer*
- e. Panel *Log*



Gambar 2.6. Panel Utama *Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*

(*Tutorial Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2015*, Autodesk, 2015)

2.2.7. Pengertian Plastik dalam Desain Plastik Molding

Plastik adalah 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:

1. *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.

2. *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 temperatur akan mengecil.

3. *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:

1. *Blowing molding*
2. *Compression molding*
3. *Extrusion molding*
4. *Transfer molding*
5. *Injection molding*

2.2.9. Prinsip Umum Desain *Mold*

Dalam desain cetakan, ada beberapa aturan yang harus perhatian. Aturan tersebut antara lain:

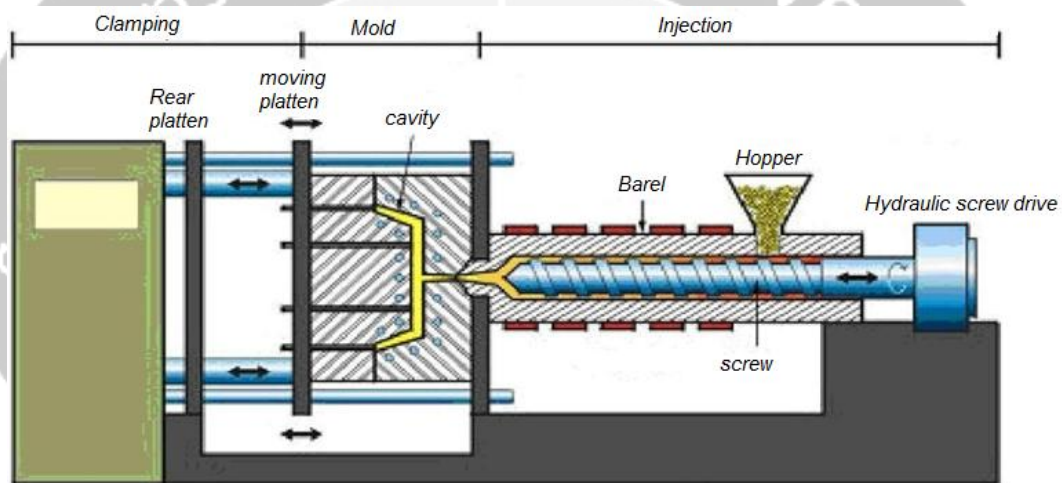
1. Gunakan ketebalan dinding seragam di seluruh bagian. Tebal dinding yang seragam akan meminimalkan penyusutan, bengkok, tegangan sisa, dan meningkatkan efisiensi proses pengisian cetakan dan waktu siklus.
2. Gunakan profil radius pada semua ujung produk. Dimensi radius sudut di dalam minimal satu kali 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 ke dalam 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*

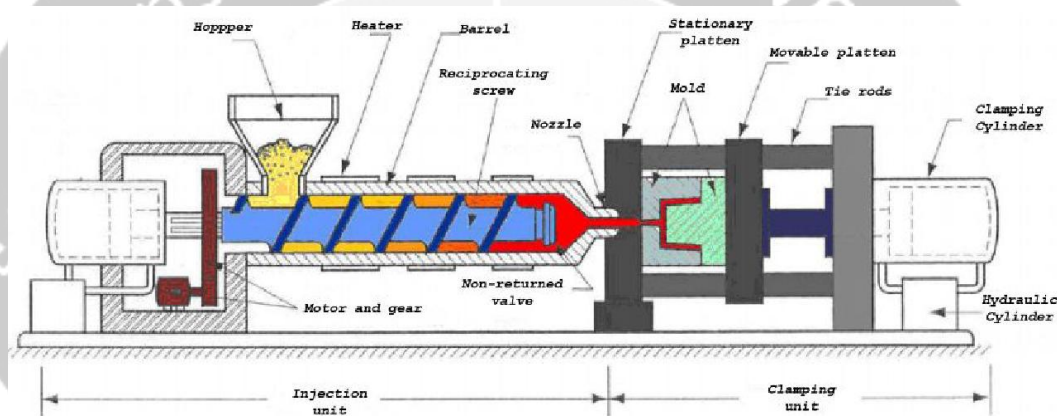
Mold unit adalah bagian lain dari mesin *plastic injection, molding unit* adalah bagian yang membentuk benda yang dibuat, secara garis besar *molding unit*

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* bisa diatur berapa panjang gerakan *molding* saat dibuka dan berapa panjang *ejector* harus bergerak.

2.2.11. Injection Unit



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

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

1. 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.

2. *Cylinder Screw Ram*

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

3. *Hopper*

Hopper adalah 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.

4. *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*.

5. *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*.

6. *Nonreturn valve*

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

2.2.12. Molding Unit

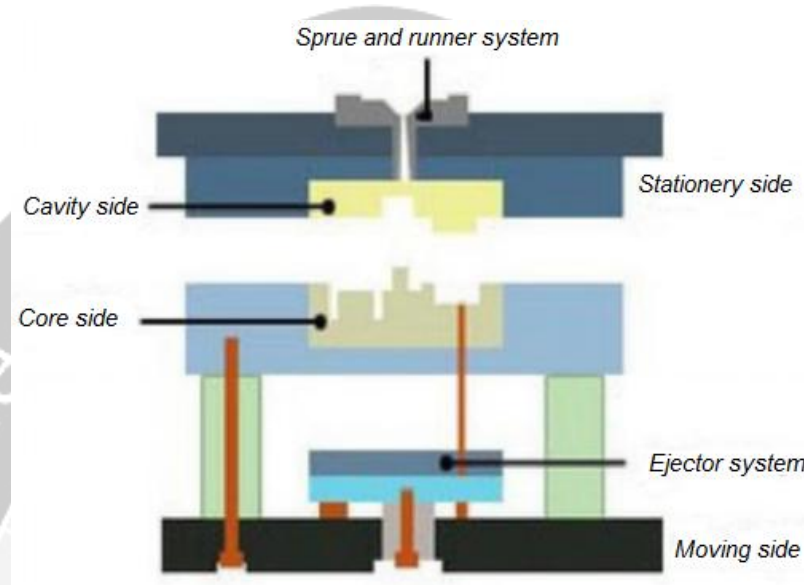
Molding unit adalah bagian yang membentuk benda yang dibuat, secara garis besar *molding unit* memiliki 2 bagian utama yaitu bagian *cavity* dan *core*, bagian *cavity* adalah bagian cetakan yang berhubungan dengan *nozzle* pada mesin, sedangkan bagian *core* adalah bagian yang berhubungan dengan *ejector*. Selain dua 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.

1. *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:

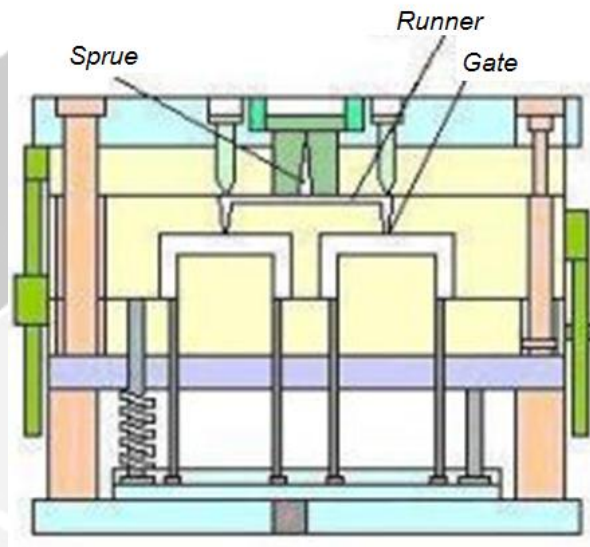
- Stationary side* (minimal satu plat) biasa di sebut *cavity side* , bagian ini adalah bagian yang diam ketika proses injeksi dilakukan, pada bagian ini terdapat *sprue* , yaitu bagian yang bertemu dengan *nozzle* mesin injeksi, bagian inilah yang menerima aliran material cair pertama kali.
- Moving 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.

2. *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.

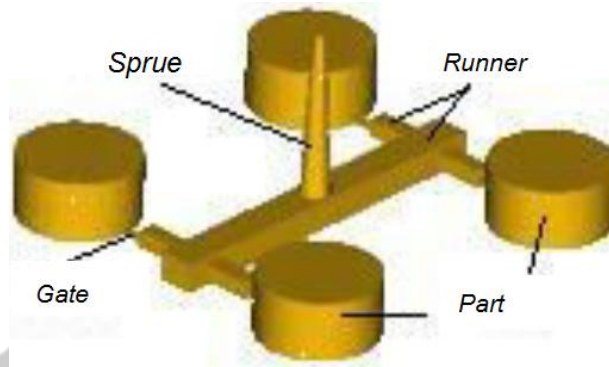


Gambar 2.10. Runner system
(*Mold Dictionary*, IMDIA, 2006)

3. 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 marks*, 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

1. 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 *cavity* nya.

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

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

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.

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

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 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

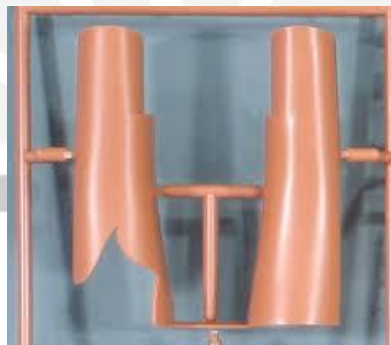
Mold yang mempunyai bentuk tidak sederhana, ukuran-ukuran yang ekstrim misalnya panjang dan tipis, atau mempunyai banyak perbedaan ketebalan dengan adanya bulatan atau tonjolan untuk tempat ulir dan sebagainya, maka penentuan faktor ini akan lebih sukar. Pada kasus semacam ini, dikenal adanya istilah 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.

2. *Short Shot*

Short shot adalah suatu kondisi dimana plastik leleh yang akan diinjeksikan ke dalam *cavity* tidak mencapai kapasitas yang ideal atau sesuai *setting* mesin, sehingga plastik yang diinjeksikan ke dalam *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*.

3. *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 *clamping pressure* 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*.

4. *Sink marks*

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



Gambar 2.14. Produk *Sink Marks*

(*Defect* pada produk plastik, Tresno, 2010)

Biasanya, perbedaan *temperature core* dan *cavity* serta *loading time* material yang terlalu cepat dapat menyebabkan *sink marks*. Temperatur *resin*, temperatur *die*, *injection speed* yang terlalu tinggi atau rendah dan kurangnya

kemampuan pendinginan dari *mold*, serta peningkatan suhu karena putaran *screw* terlalu cepat berpengaruh juga terhadap cacat ini.

5. *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*.

6. *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*.

7. *Bubbles*

Bubbles dapat dibidang 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

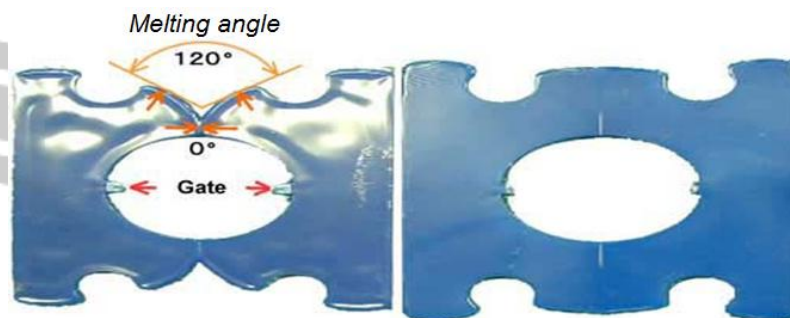
dipengaruhi oleh gas yang masih terperangkap dengan material cair dalam *cylinder*.

8. *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.

9. *Weldline*

Weldline 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. *Weldline* kadang terlihat seperti *crack* dan kehadiran *weldline* pada daerah konsentrasi tegangan dapat menyebabkan masalah kekuatan. *Weldline* harus segera ditanggulangi.



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

10. *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.

11. *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.

12. *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 kedalam 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:

1. *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:

a. *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.

b. *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*.

c. *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.

2. *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):

1. *Nominal is The Best*

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

2. *Smaller is Better*

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

3. *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 parameter secara efisien dan merupakan teknik penting dalam perancangan yang kokoh (*robust design*).

Orthogonal array digambarkan dengan $L_9(3^4)$.

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

Uraian untuk notasi di atas adalah:

1. 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*.
2. Jumlah baris, merupakan jumlah eksperimen yang dibutuhkan pada saat menggunakan *orthogonal array*.
3. Jumlah kolom, merupakan jumlah faktor yang dapat dipelajari dalam *orthogonal array* yang dipilih.
4. Jumlah level, merupakan jumlah level dari factor-faktor yang digunakan dalam eksperimen.

Bentuk standar *orthogonal array* dari Taguchi dijelaskan pada tabel di bawah 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
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^5)$	$L_{23}(5^6)$	$L_{18}(2^1 \times 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$	-	$L_{32}(2^1 \times 4^9)$
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(3^{40})$	-	-	$L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$	-	-	-	$L_{36}(2^3 \times 3^{13})$
$L_{32}(2^{31})$	-	-	-	$L_{54}(2^1 \times 3^{25})$

2.2.17. Metode Zero-One dan Matrik Analisis

Menurut Htabarat (1995) dalam Listiono (2011) metode *zero-one* adalah salah satu cara pengambilan keputusan yang bertujuan untuk menentukan urutan prioritas fungsi-fungsi. Prinsip metode ini adalah menentukan relativitas suatu fungsi “lebih penting” atau “kurang penting” terhadap fungsi lainnya. Fungsi yang “lebih penting” diberi nilai satu (*one*), sedangkan nilai yang “kurang penting” diberi nilai nol (*zero*). Keuntungan metode ini adalah mudah dimengerti dan pelaksanaannya cepat dan mudah. Metode *zero-one* dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6. Metode Zero-One

Fungsi	A	B	C	D	Jumlah
A	X	1	1	1	3
B	0	X	1	1	2
C	0	0	X	0	0
D	1	0	0	X	1

dengan :1 = Lebih penting 0 = Kurang penting X = Fungsi yang sama

Cara pelaksanaan metode *zero-one* ini adalah dengan mengumpulkan fungsi-fungsi yang tingkatannya sama, kemudian disusun dalam suatu matrik *zero-one* yang berbentuk bujur sangkar. Setelah itu dilakukan penilaian fungsi-fungsi secara berpasangan, sehingga ada matrik akan terisi X. Nilai-nilai pada matriks ini kemudian dijumlah menurut baris dan dikumpulkan pada kolom jumlah. Sebagai contoh pada tabel 2.5 diatas pada baris 1 kolom 2 bernilai 1, artinya fungsi A lebih penting dari fungsi B. Sebaiknya baris 2 kolom 1 bernilai 0. Dari matriks diatas diperoleh urutan prioritas adalah A, B, D, C berdasarkan jumlah nilai.

Pada tahap analisis menggunakan dua bentuk tabel metode *zero-one* yang berbeda, yaitu metode *zero-one* mencari bobot untuk kriteria yang diusulkan (tabel 2.7) dan metode *zero-one* untuk mencari indeks (tabel 2.8).

Bobot dan indeks tersebut nantinya digunakan dalam menghitung matriks evaluasi (tabel 2.9).

Tabel 2.7. Metode Zero-One untuk Mencari Bobot

Kriteria	No. Kriteria	1	2	3	4	Jumlah	Rangking	Bobot
A	1	X	1	1	1	3	4	$(4/12) \times 100$
B	2	0	X	1	1	2	3	$(3/12) \times 100$
C	3	0	0	X	0	0	1	$(1/12) \times 100$
D	4	1	0	0	X	1	2	$(2/12) \times 100$
Jumlah							12	

Tabel 2.7 dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pada kolom fungsi A-D merupakan kriteria komponen dari item pekerjaan yang di A-D. Dalam menentukan kriteria harus berhubungan dengan pekerjaan tersebut, misalnya dalam melaksanakan suatu pekerjaan harus direncanakan dari segi biaya, waktu, tenaga kerja dan sebagainya, asal masih berhubungan

dengan pekerjaan tersebut. Kriteria-kriteria yang dipakai harus sama dengan kriteria yang dimunculkan pada tahap kreatif. Nomor kriteria baik kolom maupun baris merupakan pemberian angka sesuai urutan kriteria.

2. Pemberian nilai 1 adalah fungsi A-D pada kolom lebih penting dari baris A-D.
3. Pemberian nilai 0 adalah fungsi A-D pada kolom kurang penting dari baris A-D.
4. Pemberian nilai X adalah fungsi A-D pada kolom dan baris mempunyai fungsi sama penting.
5. Kolom total merupakan penjumlahan pada baris penilaian.
6. Pemberian angka pada ranking sesuai jumlah kriteria yang ada, misal pada tabel terdapat 4 kriteria (A-D), maka terdapat ranking 1-4.
7. Pemberian ranking dilakukan secara terbalik, yaitu yang mendapat total tertinggi angka ranking 4, selanjutnya terus turun sampai yang total terendah mendapat angka ranking 1.
8. Sesaria (2016) menentukan bobot dengan mengambil skala bobot total 100 dan bobot dihitung dengan rumus = {angka ranking yang dimiliki / jumlah angka ranking}x 100.

Tabel 2.8. Metode Zero-One untuk Mencari Indeks

Fungsi	A	B	C	D	Jumlah	Indeks
A	X	1	1	1	3	3/6
B	0	X	1	1	2	2/6
C	0	0	X	0	0	0/6
D	1	0	0	X	1	1/6
Jumlah					6	1

Tabel 2.8 dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. A,B,C,D adalah item pekerjaan yang dianalisis.
2. Pemberian nilai 1 adalah fungsi A,B,C,D pada kolom lebih penting dari baris A,B,C,D.
3. Pemberian nilai 0 adalah fungsi A,B,C,D pada kolom kurang penting dari baris A,B,C,D.
4. Pemberian nilai X adalah fungsi A,B,C,D pada kolom dan baris mempunyai fungsi sama penting.
5. Kolom jumlah merupakan penjumlahan pada baris.
6. Indeks merupakan perbandingan jumlah dengan total jumlah pada fungsi.

Tabel 2.9. Matriks Evaluasi

Fungsi	Kriteria				TOTAL
	1	2	3	4	
	Bobot	Bobot	Bobot	Bobot	
A	Indeks	Indeks	Indeks	Indeks	ΣY
	Y	Y	Y	Y	
B	Indeks	Indeks	Indeks	Indeks	ΣY
	Y	Y	Y	Y	
C	Indeks	Indeks	Indeks	Indeks	ΣY
	Y	Y	Y	Y	

Tabel 2.9 dijelaskan sebagai berikut :

1. A,B,C adalah item pekerjaan yang dianalisis.
2. Untuk baris kriteria 1 sampai dengan 4 merupakan asumsi kriteria dari item pekerjaan yang dianalisis.
3. Untuk baris bobot diambil dari metode *zero-one* tabel 2.6.
4. Nilai indeks diambil dari metode *zero-one* tabel 2.7.
5. Untuk pekerjaan alternatif yang dipilih dilihat dari yang memiliki total indeks dikali bobot (ΣY) terbesar.