

BAB II

TINJAUAN PUSATAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

Optimasi secara umum adalah pencarian nilai terbaik dari yang tersedia dari beberapa fungsi yang diberikan pada suatu konteks. Dapat dikatakan optimal 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. Optimasi juga berarti upaya untuk meningkatkan kinerja sehingga mempunyai kualitas yang baik dan hasil kerja yang tinggi. Optimasi diperlukan untuk mempercepat waktu perencanaan, mengurangi cacat produksi dan meningkatkan kualitas produksi dalam proses injeksi plastik yang kompleks (Atmaja, 2010).

1. Penelitian Terdahulu

Salunke dkk (2015) dalam penelitiannya membahas tentang bagian blok bangunan mainan plastik dianalisis dan dipelajari untuk mengatasi masalah yang sering terjadi karena *shrinkage*, *weld line*, *air traps*, dan *sink mark*. Semua desain disimulasikan dengan Autodesk Mold flow Adviser. Aliran Simulasi Autodesk secara efektif menghilangkan penggunaan metode *trial and error* dengan memvalidasi dan mengoptimalkan desain plastik sebelum berproduksi. Metode yang dilakukan yaitu perbandingan *cooling conformal* empat desain awal dan modifikasi pada berbagai parameter sehingga waktu pengisian dan waktu *cooling conformal* dari empat desain rongga tidak meningkat sampai empat kali lebih lama daripada memiliki rongga tunggal. Jadi waktu siklus untuk empat desain rongga adalah yang paling optimal dan efisien untuk digunakan dalam proses produksi.

Seto (2015) dalam penelitiannya membahas tentang efektifitas capaian 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. Metodenya 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*). Hasil parameter setting pemesinan yang paling optimal pada produk *baseplate* adalah pada kondisi *mold temperature* 70 °C, *melt temperature* 235 °C, *injection pressure* 100 Mpa, *injection time* 1.008 detik, dan *cooling time* 9.7815 detik. Berdasarkan parameter tersebut akan didapatkan *Volumetric Shrinkage* optimal pada 7,612% dan *shrinkage* rata-rata hasil simulasi adalah 0.4871%. Hasil tersebut telah memenuhi standar kualitas yang diminta oleh customer. Total volume *base plate* adalah 46.2861 cm³ dan total beratnya adalah 44.0036 g. Total cycle time yang dibutuhkan oleh produk *base plate* dalam sekali injeksi adalah 18.9895 detik.

Budyantoro (2016) dalam penelitiannya membahas tentang simulasi berbasis komputer dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk *MoldFlow Plastic Insight* untuk memprediksi 3 kegagalan dan mengoptimalkan kualitas produk dengan pengurangan indeks *Sink Mark*, meminimalkan estimasi jumlah *sink mark* dan *volumetric shrinkage* karena variasi ketebalan *extreme*. Metode yang digunakan dalam penelitian yaitu menentukan lokasi *gate*, variasi ketebalan ekstrim, prediksi kualitas untuk mold 2 *cavities*, dan konfigurasi parameter proses. *Sink mark* indeks yang tinggi menunjukkan potensi *shrinkage* yang tinggi. Besarnya kedalaman *sink marks* ditunjukkan oleh nilai *Sink Mark Estimate*. Kedua hasil tersebut memiliki kaitan langsung dengan nilai *shrinkage* (penyusutan) yang ditunjukkan oleh *Volumetric Shrinkage*.

2. Simpulan dari Penelitian Sebelumnya

Seiring dengan perkembangan teknologi dan besarnya permintaan produk plastik, manufaktur plastik konvensional mulai berubah dan beralih kepada konsep manufaktur plastik modern. Dalam hal ini, simulasi akan menemukan

nilai-nilai optimal produk yang akan dihasilkan sehingga meminimalkan cacat produk.

Penelitian yang sekarang ini mengembangkan metode dan parameter dengan penelitian yang sebelumnya dalam mencari parameter dan optimasi produk. Penulis terdahulu seperti Saluke dkk (2015), Budiyanoro (2016), dan Seto (2015) melakukan penelitian dengan studi eksperimental simulasi, sedangkan penulis melakukan optimasi produk dengan bantuan analisis simulasi Moldflow Insight.

Penelitian ini mengambil study kasus dari produk *sparepart* motor yaitu *top case*. *Top case* merupakan bagian dari *sparepart engine* motor, produk ini diproduksi dengan *mold 2 plate* dan *single cavity*. Metode awal dengan simulasi moldflow insight untuk mencari kesalahan atau kegagalan produk yang akan terjadi akibat mekanisme pengisian dan pendinginan yang buruk sehingga meminimalkan kegagalan produk yang dihasilkan. Dengan membandingkan beberapa simulasi yang dilakukan sehingga menemukan hasil yang optimal. Dari penelitian sebelumnya peneliti mengembangkan parameter yang digunakan adalah *mold temperature*, *melt temperature* dan *injection pressure* karena dapat mengurangi dampak kegagalan produk akibat cacat *sink mark* dan *shrinkage*.

2.2. Dasar Teori

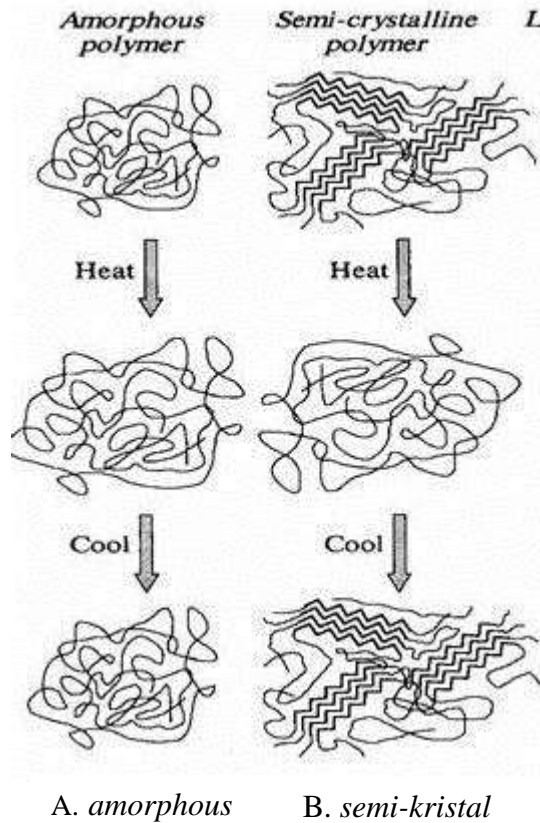
2.2.1. Morphologi (*Amorphous* dan Semi-Kristal)

Morphologi menjelaskan tentang bentuk dan struktur molekul polimer dalam keadaan solid. Dalam kondisi solid polimer dapat berstruktur *amorphous* (non kristal) atau semi-kristal, istilah semi-kristal digunakan karena kondisi kristal penuh tidak akan dapat dicapai oleh polimer karena dapat dipastikan adanya bagian *amorphous* yang menghubungkan bagian kristal. Adapun Bahan semi-kristal polimer dapat mengandung fraksi kristal yang berbeda-beda, nilai kandungan pada kristal dalam prosentase disebut sebagai derajat kristalisasi (*degree of crystallinity*). Derajat kristal bervariasi dari dominasi daerah *amorph* yang lebih besar hingga mendekati 95% kristal, berbeda dengan metal yang mengandung 100% kristal, atau bahan keramik yang dapat mengandung 100% kristal atau 100% non kristal.

Derajat kristal sangat dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan selama proses pembekuan. Selama kristalisasi dari kondisi awal cair, rantai molekul akan tampak sangat acak. Dengan waktu pendinginan yang cukup bagian kristal akan terlipat secara teratur yang terhubung oleh bagian kristal lainnya dengan pengikat *amorphous*. Struktur *amorphous* terlihat tak teratur dan dapat dilihat pada (Gambar 2.1 A), kondisi ini yang memungkinkan polimer bersifat fleksibel. Polimer berstruktur *amorphous* secara fisik transparan dan dalam pemrosesannya lebih mudah (memerlukan suhu relative rendah), sedangkan polimer semi-kristal (Gambar 2.1 B) tampak buram karena kandungan kristal akan menghalangi transmisi cahaya. Kandungan kristal juga memberi kontribusi pada kekuatan, kekakuan, dan resistensi terhadap kondisi luar.

Kedua jenis polimer ini akan tampak berstruktur sama saat dipanaskan karena baik *amorphous* maupun semi kristal saat dipanaskan akan mengalami perenggangan, khususnya untuk semi-kristal, bagian kristal yang terlipat akan terurai dan tampak tidak teratur atau acak. Namun saat kembali didinginkan, bagian kristal akan terlipat dan teratur kembali. Oleh karena itu jika dilihat dari besarnya penyusutan, polimer semi kristal akan menyusut lebih besar jika

dibandingkan dengan polimer *amorphous*. Perubahan secara morfologis akibat pemanasan dan pendinginan dapat dilihat pada gambar 2.1 (Budyantoro, 2009).



Gambar 2.1. (A) *amorphous* dan (B) *semi-kristal* polimer kondisi cair dan solid (telah diolah kembali) (Suharsini dkk, 2007)

Dari tabel 2.1 dapat disimpulkan bahwa morfologi sangat berpengaruh pada sifat fisik, penampilan, maupun perubahan karena pengaruh panas. Beberapa jenis polimer yang dikelompokkan menurut morfologinya dapat dilihat berikut ini:

1 Kelompok *amorphous*: PC, PS, PVC, PPS, ABS, PMMA, PPO, PAN.

2 Kelompok semikristal: PP, PA, PET, PBT, POM.

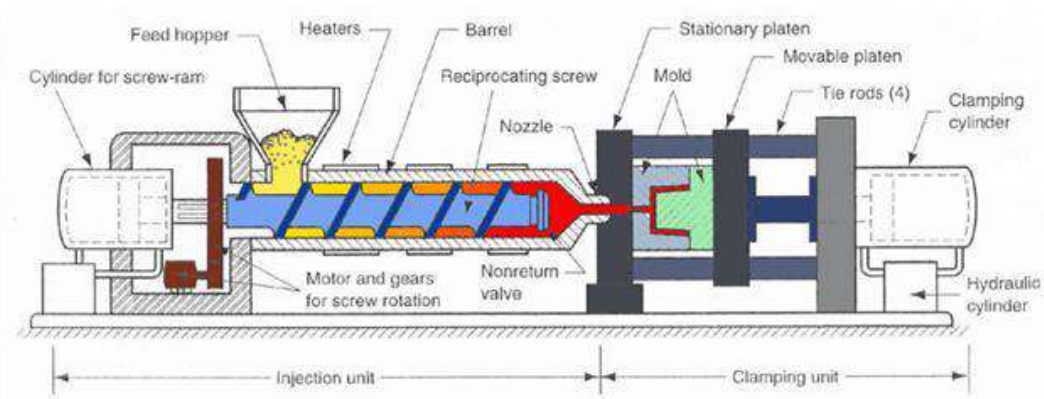
Tabel 2.1, adalah perbandingan sifat-sifat bahan dari kedua jenis struktur polimer.

Tabel 2.1. Perbedaan sifat morfologi polimer (Budiyantoro, 2009).

Jenis Polimer	<i>Amorphous</i>	Semi-Kristal
Struktur mikro	Orientasi molekul acak, dalam kondisi cair maupun padat	Orientasi molekul acak dalam kondisi cair, teratur, dan kompak dalam kondisi padat
Reaksi terhadap panas	Melunak pada daerah temperature lebar	Titik lebur tertentu
Sifat-sifat umum		
Transparansi	Transparan	Buram (<i>Opaque</i>)
<i>Specific gravity</i>	Rendah	Tinggi
Kekuatan tarik	Rendah	Tinggi
Modulus elastisitas	Rendah	Tinggi
Keuletan	Tinggi	Rendah
Ketahanan terhadap deformasi rambatan (<i>creep</i>)	Rendah	Tinggi
Suhu operasi	Rendah	Tinggi
Performa fatigue	Rendah	Tinggi
Aliran	Rendah	Tinggi
<i>Shrinkage & warpage</i>	Rendah	Tinggi
Ketahanan terhadap kimia	Rendah	Tinggi
Penampilan <i>surface</i>	Tinggi	Rendah
Stabilitas ukuran	Tinggi	Rendah

2.2.2. Injection Molding

Injection molding adalah metode dari pembentukan material termoplastik dimana material yang meleleh akibat panas dan gesekan didalam *barrel* diinjeksikan ke dalam cetakan kemudian didinginkan oleh air/oil sehingga produk mengeras. Secara umum pengertian *injection molding* adalah proses pembentukan suatu benda atau produk dari material plastik yang dipanaskan dan diinjeksikan kedalam cetakan. Pada mesin *injection molding* terdapat beberapa bagian utama yang berperan penting pada saat proses pembuatan produk plastik, adapun pada mesin *injection molding* dibagi menjadi tiga garis besar seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. *Injection molding* (Lera, 2009).

a. *Clamping unit*

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

b. *Injection Unit*

Injection unit berfungsi melelehkan dan memasukkan material plastik ke dalam cetak.

c. *Mold Unit*

Mold Unit adalah bagian terpenting untuk mencetak produk plastik, bentuk benda/produk plastik sangat tergantung dari bentuk *mold*, karena setelah material plastik mencair kemudian diinjeksikan ke dalam cetakan atau *mold*, dan dinginkan maka akan terbentuk produk plastik sesuai dengan bentuk *mold*, ada berbagai tipe *mold*, di sesuaikan dengan bentuk benda yang akan dibuat.

2.2.3. Bagian – bagian *Injection Molding*

1. Injection Unit

Pengolahan Polimer Plastik yang dimulai dengan masuknya Polimer dalam bentuk Pelet (Granule), kemudian dipanaskan didalam *barrel* dengan suhu leleh plastik dan dilakukan pencampuran pada *screw* di dalam *barrel*. Dengan ini *screw* berfungsi sebagai *mixer* plastik cair agar pencampuran plastik menjadi rata dan seimbang., berikut bagian dari injection unit adalah :

a. Motor dan *Transmission Gear Unit*

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

b. *Cylinder screw ram*

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

c. *Hopper*

Hopper adalah tempat untuk menempatkan material plastik sebelum masuk ke dalam *barrel*, *hopper* biasanya digunakan untuk tempat penyimpanan khusus yang dapat mengatur kelembapan material plastik, sebab apabila kandungan air terlalu besar dapat menyebabkan hasil injeksi yang tidak bagus.

d. *Barrel*

Barrel adalah tempat *screw* dan saluran plastik yang menjaga aliran plastik ketika di panasi oleh *heater*, pada bagian ini juga terdapat *heater* untuk memanaskan plastik sebelum masuk ke *nozzle*.

e. *Screw*

Screw berfungsi untuk mengalirkan plastik dari hopper ke *nozzle*, ketika *screw* berputar material dari *hopper* akan tertarik mengisi *screw* yang selanjutnya di panasi lalu didorong ke arah *nozzle*.

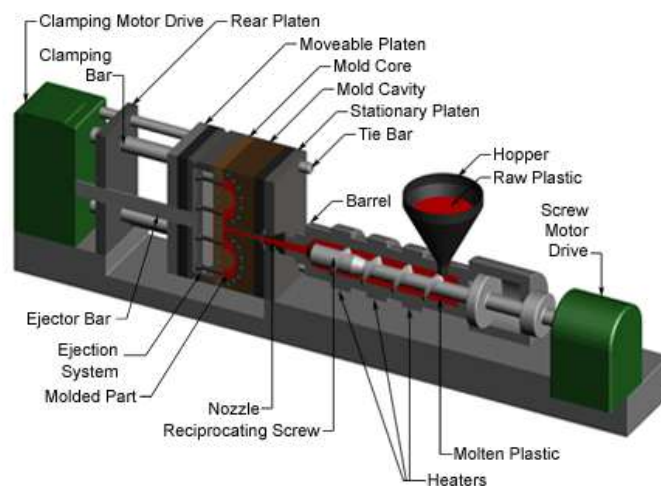
f. *Heater*

Heater ini berfungsi sebagai pemanas material (*resin* dan *blues*). Pemanasan dilakukan pada material yang dibawa *screw* dari *hopper*. Pemanasan yang dilakukan pada *resin* berkisar 280 C.

g. *Nozzle*

Nozzle berfungsi sebagai pemindah bahan yang sudah dipanaskan dari *injection unit* ke *clamping unit*. Dengan kata lain dari unit inilah di injeksikan ke dalam cetakan (*mold*) (Inteknika, 2014).

Dari penjelasan bagian *injection unit* berikut gambar 2.3, menunjukkan bagian-bagian *injection molding* itu sendiri.



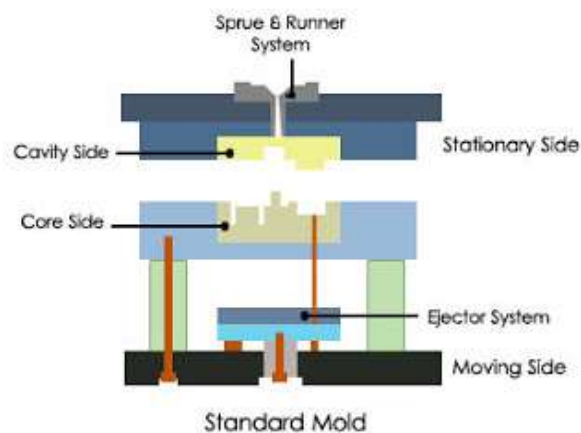
Gambar 2.3. Bagian-bagian Injection Molding (Chuby, 2011).

2. Kontruksi Mold

Umumnya kontruksi mold dibagi atas 2 type, tipe-tipe lainnya adalah turunan atau pengembangan dari ke dua model tersebut.

a. *Mold two plate*

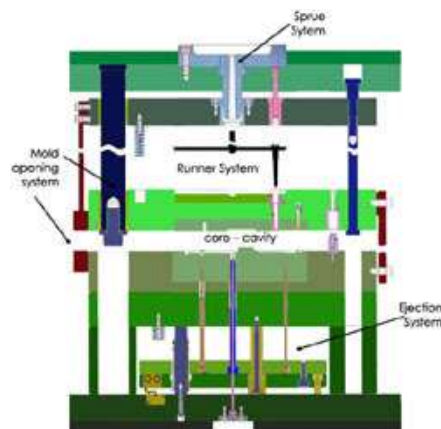
Terdapat satu parting line diantara dua bagian yaitu *cavity* dan *core* atau disebut juga mold *stationary* dan mold *move* atau di sebut juga plat A dan plate B, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Two plate (Arlina, 2017).

b. *Mold three plate*

Terdapat dua parting line dalam satu sisi parting line pada *runner plate* dan satu sisi pada *cavity plate*, *core plate* atau disebut juga mold *stationary* dan mold *move* atau di sebut juga plat A dan plate B. Sering juga di sebut *Pin Point Gate*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Three plate (Arlina, 2017).

2.2.4. *Sink mark*

Sink mark adalah lekukan di permukaan dimana ada perubahan yang signifikan pada dinding (*rib* yang disebabkan oleh kontraksi *termal*). Tidak memungkinkan untuk menghilangkan beberapa bekas *sink mark* dengan menggunakan tekanan tinggi, namun menggunakan tekanan yang lebih rendah menghasilkan bagian dengan tanda *sink mark* yang dapat diterima. Karena perubahan plastik dari lelehan ke padat sekitar 25% dan kompresibilitas plastik pada tekanan cetak injeksi hanya sekitar 15%, tidak mungkin cetakan mencegah *sink mark* hanya dalam tahap tekanan udara saja (Shoemaker, 2006).

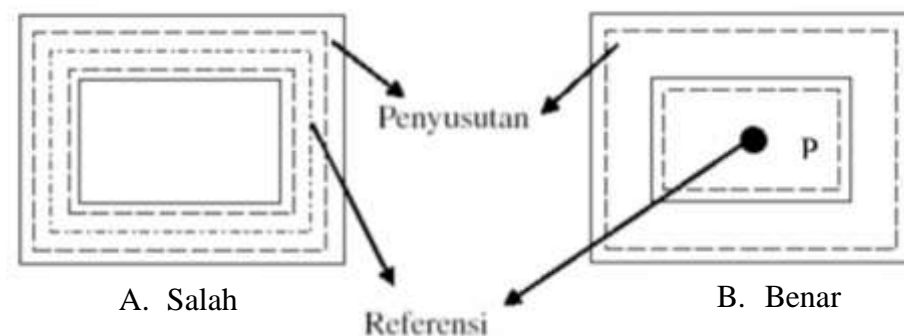
Menurut Wiwin (2017), pada umumnya pengaturan parameter proses menentukan hasil akhir dari sebuah produk yang dibuat. Parameter tersebut dapat diatur dimesin injeksi, akan tetapi ada parameter proses yang harus dicapai terutama yang berhubungan dengan spesifikasi bahan plastik. Berikut adalah penyebab-penyebab timbulnya cacat *sink marks*:

1. Temperatur *barel* terlalu tinggi, sehingga penyerapan panas oleh dinding cetakan terlalu besar dan mengakibatkan meningkatnya daerah yang kosong antar molekul plastik. Pada saat pendinginan, bagian permukaan akan mengeras dan molekul plastik yang berada dibawahnya akan mengisi kekosongan dan menarik kulit permukaan tersebut kearah dalam semakin besar
2. Kekosongan yang terjadi, semakin besar derajat penyusutannya dan *sink mark* terbentuk semakin besar.
3. Tekanan yang rendah atau waktu injeksi yang kurang, sehingga menyebabkan terbentuknya kekosongan yang berlebihan antar molekul dan menarik material yang telah dingin dan menyebabkan penyusutan berlebih.
4. Pembukaan cetakan terlalu cepat sehingga waktu pendinginan menjadi kurang.
5. Pertemuan antara dinding dan sirip yang membentuk bagian menebal pada bagian tersebut.

2.2.5. Shrinkage

Suatu kondisi penyimpangan (*deviation*) pada pembentukan plastik, perencana harus selalu memperhitungkan adanya penyusutan material setelah material atau (benda kerja) terbentuk. Hal ini disebabkan karena adanya perlakuan panas disertai dengan penekanan. Sehingga akan mengalami perubahan dimensi jika dibandingkan dengan ukuran pada mold, maka ukuran produknya akan berbeda, yaitu ukuran luar benda kerja akan lebih kecil dibanding cavity (Amri, 2009).

Arah penyusutan material yang menuju ke sebuah titik referensi di dalam benda kerja, artinya tidak boleh mengambil bidang atau garis yang ada di dalam produk. Untuk mengamati arah penyusutan ini lebih jelas, dapat diperhatikan dari ilustrasi pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Arah penyusutan (Amri, 2009).

Gambar 2.6 A. Menunjukkan tafsiran arah penyusutan yang salah, karena pada kenyataannya hasil lubang pada produk bukannya bertambah besar seperti gambar, tetapi justru menjadi lebih kecil. Jadi referensi pengamatan bukannya merupakan sebuah garis atau bidang didalam produk tersebut.

Gambar 2.6 B. Menunjukkan tafsiran arah penyusutan yang benar, yaitu bahwa semua titik yang ada pada produk akan menyusut menuju ke titik referensi P. Jadi hasil lubang pada produk juga akan menyusut lebih kecil ke arah titik P.

2.2.6. Desain untuk Injection Molding

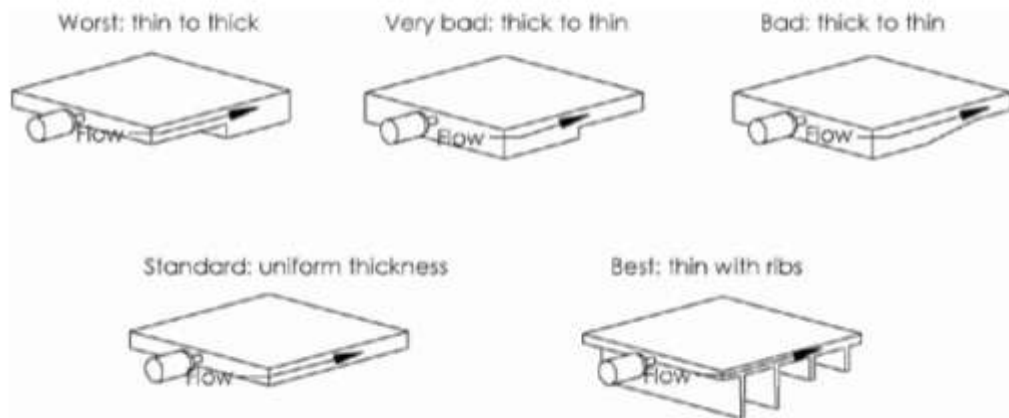
Sebuah tinjauan tentang desain plastik harus dilakukan sebelum desain dan pembuatan cetakan injeksi. Tinjauan desain harus mempertimbangkan dasar-dasar desain bagian plastik, serta masalah lain yang terkait secara khusus dengan desain cetakan. Pertimbangan desain bagian ini selanjutnya akan dibahas.

A. Menyamakan Ketebalan Dinding

Bagian dari ketebalan dinding yang bervariasi harus dihindari karena berkaitan dengan biaya dan kualitas. Masalah mendasarnya adalah bagian dinding yang tebal dan tipis akan mendingin pada tingkat yang berbeda.

Bagian yang lebih tebal memakan waktu lebih lama untuk mendinginkan dibandingkan bagian yang lebih tipis. Perbedaan pola dan perbedaan bagian diferensial dapat menyebabkan distorsi geometrik yang signifikan dari bagian yang diberi koefisien ekspansi termal tinggi untuk plastik. Perbedaan mencolok pada ketebalan dinding harus dihindari jika memungkinkan, karena void internal dapat terbentuk secara internal karena penyusutan berlebih pada bagian yang tebal bahkan dengan waktu pengepakan dan pendinginan yang lama.

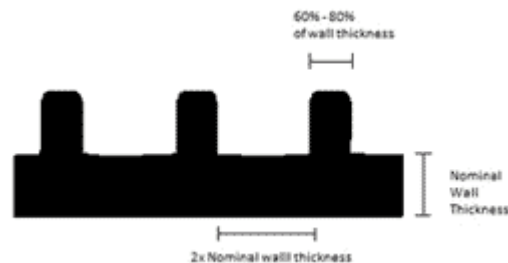
Gambar 2.7. memberikan perkembangan desain cetakan dengan ketebalan yang berbeda di bagian tertentu. Desain bagian terburuk, yang ditunjukkan di sebelah kiri, memiliki lelehan yang mengalir dari bagian tipis ke bagian yang tebal dengan transisi yang tajam. Desain dapat diperbaiki lebih lanjut dengan cara mentransisikan bagian tebal ke bagian tipis. Meski begitu, setiap desain cetakan dengan variasi ketebalan dinding yang signifikan akan menunjukkan waktu pendinginan yang diperpanjang dan tingkat penyusutan yang berbeda pada bagian yang tebal dan tipis. Untuk meningkatkan ketebalan dinding akan menghilangkan banyak masalah yang berkaitan dengan kualitas bagian, namun dapat menyebabkan konsumsi bahan yang berlebihan dan waktu pendinginan yang lama.



Gambar 2.7. Menyamakan Ketebalan Dinding (Shoemaker, 2006).

B. Rib Design

Desain *rib* ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dalam perancangan ini, ketebalan *rib* harus kurang dari ketebalan dinding, ketebalan yang disarankan adalah 60% sampai 80% dari dinding normal. *Rib* yang lebih tebal akan cenderung menarik material dari bagian tengah yang berlawanan saat *rib* mendingin. Penyusutan di wilayah ini akan menyebabkan rongga internal atau *sinkmark* muncul di sisi bagian yang berlawanan dengan *rib*.

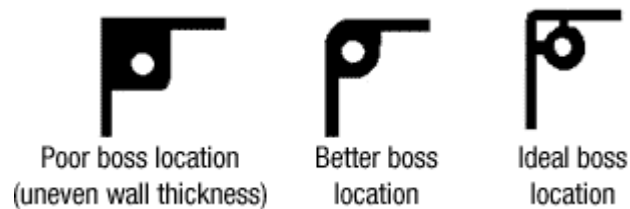


Gambar 2.8. Rib Design (Innovative, 2008).

C. Boss Design

Boss design digunakan untuk beberapa bagian komponen seperti perakitan atau pemasangan *part*. Beberapa desain *boss* yang berbeda disediakan pada Gambar 2.9. Sebagian besar desain memberi *boss* di dekat sudut dengan dua *rib* dan *gusset* ditempatkan pada 120° . Kebanyakan desain menunjukkan *boss* berdiri dengan rusuk *gusset* yang menyediakan permukaan perakitan yang tinggi. Semua desain *boss* memanfaatkan ketangguhan *rib*, dan *gusset*. *Boss* yang dirancang harus dapat menahan torsi yang diterapkan saat pemasangan *part* tambahan

seperti sekrup dan kekuatan tarik potensial yang diterapkan selama digunakan. Dalam desain Gambar 2.9, rancangan yang digunakan pada *boss* dan *gussets*.



Gambar 2.9. *Boss Design* (Innovative, 2008).

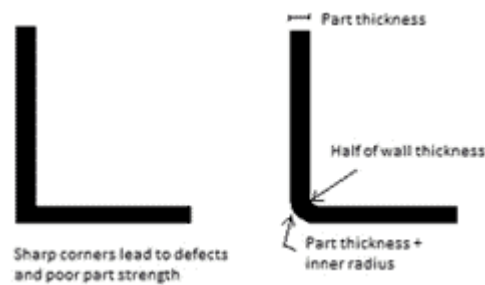
D. Desain Sudut

Sudut tajam sering ditentukan dalam desain produk untuk memaksimalkan volume komponen, memudahkan untuk kombinasi antar komponen, atau untuk alasan estetika. Namun, sudut tajam dalam produk cetakan harus dihindari karena berbagai alasan yang berkaitan dengan kinerja produk, desain cetakan, dan pencetakan injeksi:

- Sehubungan dengan kinerja produk, sudut tajam akan menghasilkan konsentrasi stres yang dapat menyebabkan banyak bahan (rapuh) gagal di bawah beban. Selanjutnya, kotak dengan sudut tajam mungkin tidak memiliki kekakuan torsi dari lengkungan yang lebih pendek.
- Sehubungan dengan desain cetakan, sudut tajam bisa sangat sulit diproduksi, membutuhkan penggunaan proses pemesinan khusus atau penggunaan alat pemotong dengan ukuran yang semakin rendah.
- Sehubungan dengan proses pencetakan, sudut tajam sangat membatasi aliran panas dari polimer yang meleleh ke sisipan inti (bagian dalam) dengan perpindahan panas ke sisipan rongga (luar bagian). Hasilnya seringkali penyusutan diferensial di seluruh ketebalan sudut yang signifikan dari bagian cetakan.

Beberapa pedoman umum untuk sudut *fillet* disediakan pada Gambar 2.10. Seperti yang ditunjukkan, jari-jari *fillet* pada sudut eksternal harus lebih besar dari ketebalan dinding. Untuk mempertahankan ketebalan yang sama di lengkungan, *fillet* di sudut internal diatur lebih kecil dari ketebalan dinding. Dalam kebanyakan program desain modern, *fillet* ini dapat mudah mengisi tepi

luar sebelum mengisi bagian tersebut sehingga menyebabkan *air trap* pada lengkungan. Selain itu, Perancang cetakan harus menyesuaikan jari-jari *fillet* yang sesuai dengan geometri yang sudah ditentukan sehingga alat khusus tidak perlu dilakukan secara *custom*.



Gambar 2.10. Perbandingan *fillet* dan *chamfer* (Innovative, 2008).

E. Sudut Miring (*Draft angle*)

Rancangan mengacu pada sudut miring yang ditempatkan di antara permukaan vertikal cetakan dari arah cavity. Sudut miring biasanya diterapkan untuk memudahkan mengeluarkan part pada cetakan. Perancang produk sering menghindari penerapan sudut miring yang signifikan, karena mengubah bentuk estetika desain dan mengurangi volume internal cetakan. Meski begitu, sudut miring biasanya diterapkan pada cetakan plastik untuk menghindari masalah pelepasan dan desain cetakan yang sangat kompleks.

Sudut miring pada *rib* harus ditentukan dengan cermat. Pada desain *rib* sebelumnya yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, misalnya sebuah sudut draft 2° diterapkan untuk memudahkan bagian dari cetakan. Dalam hal *fungsi* produk, sudut draft yang lebih rendah diinginkan karena hal ini memungkinkan *rib* lebih tinggi dan tebal dengan kekakuan yang lebih besar. Namun, sudut draft yang lebih rendah (seperti $\frac{1}{2}$ atau 1°) dapat menyebabkan bagian tersebut menempel sehingga sulit untuk dikeluarkan pada cetakan, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

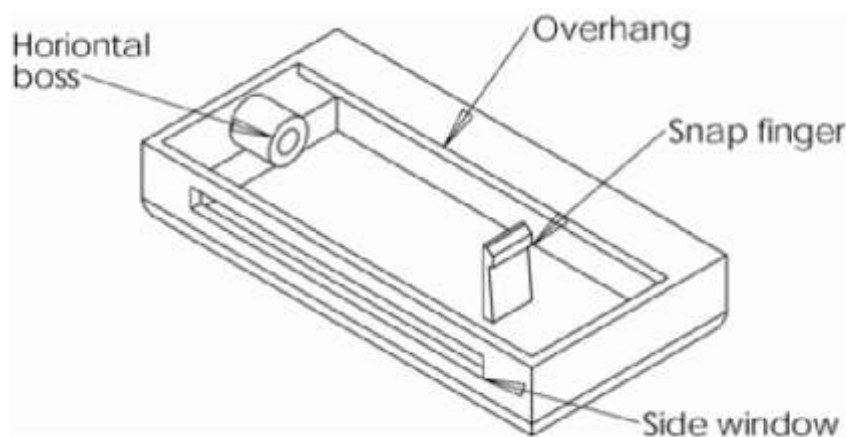
Tabel 2.2. Contoh sudut miring (*Draft angle*) (Shoemaker, 2006).

Surface finish	Resin	Roughness (μm)	Draft
Class A-1	Acrylic	0.01	0.5°
Class B-3	ABS	12	1.5°
Sand texture	20% GF PC	12	2°
Leather texture	Soft PVC	125	4°
Leather texture	ABS	125	7.5°

Eject dapat diperparah saat dicetak dengan bahan mika dan kaca yang memiliki penyusutan rendah dan kekasaran permukaan tinggi. Demikian sudut miring minimum 0,5°, dengan 1 sampai 2° biasa digunakan sesuai dengan rekomendasi material.

F. Undercut

Undercut adalah fitur dalam desain produk yang mengganggu proses *eject* dari cetakan. Empat fitur desain khas yang memerlukan lapisan bawah diperlihatkan pada Gambar 2.11. Fitur desain ini meliputi, *horizontal boss*, *overhang*, *snap finger*, dan *side window*. Sebagian besar saat perancang produk tidak menyadari kesulitan yang terkait dengan penggunaan *undercut* ini.

Gambar 2.11. Beberapa fitur *undercut* (Shoemaker, 2006).

Bila memungkinkan, *undercut* harus dihindari karena mekanisme cetakan yang harus dirancang dan dipasang untuk pembentukan dan pengurangan bagian. Komponen cetakan tambahan ini dapat membuat cetakan lebih sulit untuk

digunakan, bahkan merusak cetakan jika digunakan dengan tidak semestinya. Oleh karena itu alasan ini, desainer cetakan harus mengidentifikasi cara-cara yang tidak diinginkan, memperingatkan pelanggan, dan bekerja dengan perancang produk untuk melepaskan lapisan bawahnya.

2.2.7. Software Simulasi Moldflow Plastic Insight

Moldflow Plastik Insight adalah perangkat lunak yang paling sering digunakan untuk memodelkan, menganalisa, mengoptimalkan desain produk plastik dan cetaknya. Moldflow menyediakan beberapa paket yang dapat digunakan untuk pemodelan berbagai jenis proses injeksi plastik dengan berbagai jenis bahan plastik (*thermoplast* dan *termoset*). Moldflow 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.

2.2.8. Tahap Simulasi Moldflow Plastic Insight

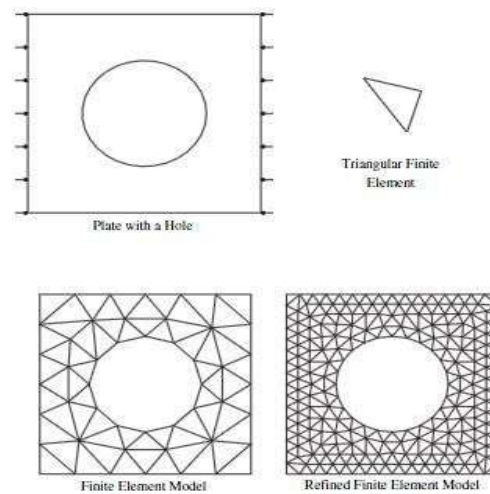
A. Pre-Processing

Persiapan untuk simulasi pekerjaan mulai dengan menggambar dimensi serta geometri model yang akan dianalisa. Desain yang akan dianalisa harus berbentuk 3D (*model volume*). Akses format yang dapat dibaca moldflow, yaitu : *.Ipt , *Stl, dan *IGS, apabila model yang digunakan tidak memenuhi syarat format yang telah ditentukan maka format data model tersebut dapat dikonversikan.

B. Meshing

1. Jenis Elemen

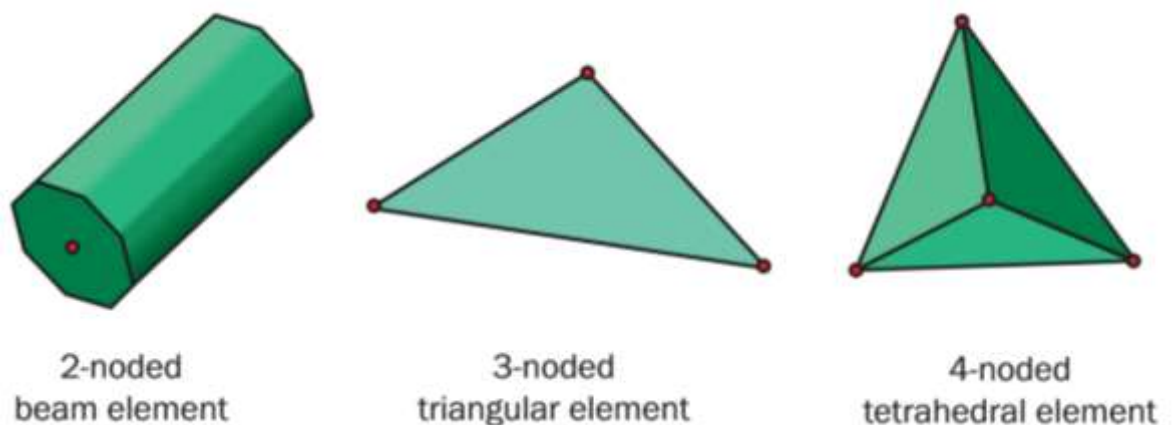
Moldflow menggunakan tiga jenis *elemen* untuk analisis. Jenis jala menggunakan kombinasi menurut detail yang akan digunakan untuk analisa semakin detail produk yang akan dianalisa maka akan semakin banyak elemen.



Gambar 2.12. Proses Meshing Produk 3D (Shoemaker, 2006)

Terdapat 3 jenis elemen yang bias digunakan dalam pemodelan, yaitu :

- *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.
- *Tetrahedral*: terdiri dari 4 nodal, biasa digunakan di geometri produk, *core*, *feed system* (untuk pemodelan 3 dimensi)



Gambar 2.13. Jenis Elemen *Mesh* (Shoemaker, 2006).

C. Jenis Meshing

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

1. *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 nodal 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, *warpage* dan *orientasi* serat tambahan.

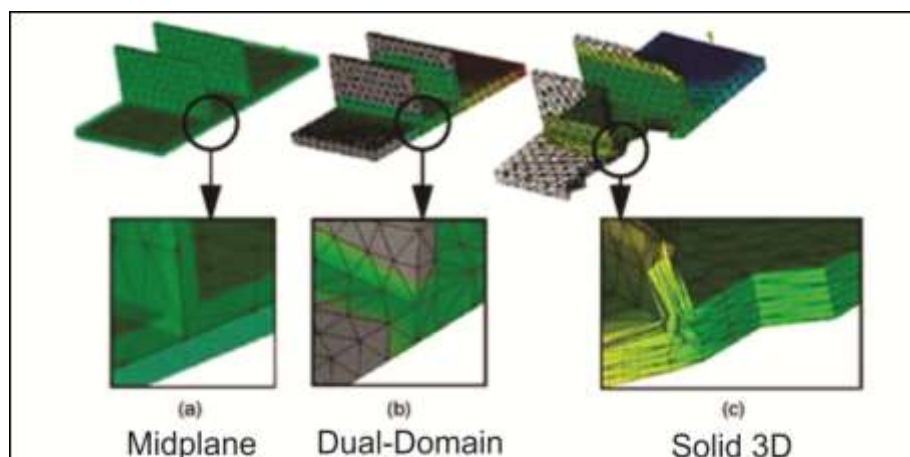
2. *Dual-Domain*

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, *warpage* dan *orientasi* serat tambahan.

Pemodelan dengan metode *meshing midplane* dan *dua-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.

3. *Solid 3D*

Dalam metode *meshing Solid 3D*, keseluruhan volume model diisi dengan elemen *tetrahedral*. Metode *Solid 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, seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. *Type Mesh* (Shoemaker, 2006)

D. *Modeling Mold*

Simulasi Moldflow memungkinkan untuk beberapa macam proses injeksi molding dimana dari beberapa macam yang mempunyai fungsi dan peran masing-masing. Dalam penelitian ini penulis menggunakan *Thermoplastics Injection Molding*. Urutan analisis mulai dari menentukan lokasi *gate* injeksi, diikuti dengan proses pengisian, aliran, pendinginan, dan *warp*.

E. *Material*

Properties material diperlukan sebagai pendukung untuk berjalannya simulasi. Perbedaan jenis bahan dan produsen menyebabkan tuntunan proses yang berbeda untuk tiap-tiap material, pemilihan material juga dipertimbangkan terkait dengan kebutuhan konsumen, kegunaan produk, dan desain.

F. Gate Location

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 moldflow plastic insight. Seringkali nilai ini hanya digunakan sebagai nilai awal, karena nilai-nilai tersebut akan berubah seiring dengan proses optimasi dan percobaan yang dilakukan.

G. Runner System

Sistem *runner* merupakan bagian penting dalam merancang sirkuit aliran plastik dalam 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.

F. Analisa

Setelah desain dan sistem selesai dibuat dengan model yang telah ditentukan, maka program dapat segera dikerjakan dalam simulasi moldflow plastic insight.

2.2.9. Jenis Analisa Moldflow Plastic Insight

A. *Gate Location*

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

B. *Molding window*

Molding window digunakan untuk menghitung kondisi awal proses ideal 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. *Fill*

Fill mensimulasikan tekanan injeksi saat proses *fill* dan *holding* 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.

D. *Flow*

Analisis *Flow* mensimulasikan tekanan injeksi saat proses *fill* dan *holding* 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.

E. *Cooling system*

Moldflow menyediakan alat untuk pemodelan analisa rangkaian sistem pendingin pada cetakan molding yang digunakan untuk menganalisa efisiensi sistem pendinginan cetakan molding. 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.

F. *Warpage*

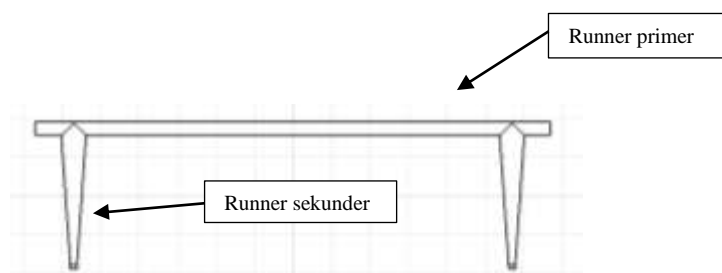
Warpage memungkinkan pengguna untuk memahami penyebab penyusutan dan deformasi pada proses injeksi saat produk plastik dihasilkan serta memprediksi di mana deformasi akan terjadi. Hasil dari analisa ini memungkinkan pengguna untuk mengoptimalkan desain, bahan, dan parameter pengolahan untuk mengontrol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

2.2.10. Runner System

Pola pengisian cetakan melalui perbaikan perancangan sistem *runner*, dengan perangkat lunak secara otomatis telah dikembangkan, misalnya menggunakan Moldflow. Simulasi numerik digunakan untuk mengubah posisi *runner* untuk menentukan aliran *polymer* yang paling tepat, sehingga dapat meminimalkan waktu pengisian. Selain itu, dengan mengubah bentuk dari penampang *runner* yang dapat menyeimbangkan pengisian rongga *multi-cavity* (Kaswadi, 2017).

Didalam sistem runner, runner sendiri memiliki 2 tipe yaitu runner primer dan runner skunder.

- a. *Runner* primer adalah runner sebelum runner sekunder dan mengalirkan cairan dari sprue.
- b. *Runner* sekunder adalah runner yang langsung mengarah ke produk.



Gambar 2.15. Tipe *runner*

Saat merancang sistem runner, ada tiga pertimbangan utama yaitu sebagai berikut:

- 1) Bentuk runner
- 2) Tata letak runner
- 3) Dimensi runner

Adapun rumus mencari diameter runner sebagai berikut

$$D = \frac{W^{\frac{1}{2}} \times L^{\frac{1}{4}}}{3.7} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan

D = diameter *runner* (mm)

W = berat produk (g)

L = panjang *runner* (mm)

Bentuk runner mempengaruhi jumlah aliran material plastik dan penurunan tekanan (*preassure drop*) yang timbul akibat terjadinya kontak lapisan yang mengering pada bagian dinding runner.

2.2.11. Gate

Faktor-faktor yang mempengaruhi ukuran dan *gate*. Semua bahan plastik adalah cairan *non-Newtonian* (*n-Nfs*). Perbedaan antara *n-Nfs* dan *fluida Newtonian* (*Nfs*) (misalnya air) adalah *viskositas* (*resistance to flow*) *K*, dari *Nf* yang mengalir tidak berubah melintasi jalur aliran dalam saluran bulat, namun *viskositas nff* berubah dengan suhu dan dalam kaitannya dengan memotong laju.

$$\dot{\gamma} = \frac{4\dot{Q}}{\pi r^3} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

$\dot{\gamma}$ = shear rate sec^{-1}

\dot{Q} = Material

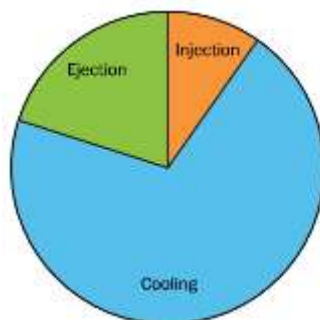
r = radius of runner channel (cm)

Shear rate $\dot{\gamma}$ meningkat dengan volume (laju alir) material (\dot{Q}), karena pada saat tekanan yang lebih tinggi akan mendorong jumlah plastik yang sama

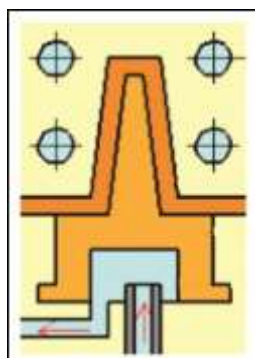
(per satuan waktu) melalui saluran meningkat secara signifikan dengan pengurangan diameter saluran (r). Contoh akan menggambarkan hasil yang menarik (Jones, 2008).

2.2.12. Cooling System

Pendingin cetakan dapat mencapai lebih dari dua pertiga dari total waktu siklus dalam produksi bagian termoplastik injeksi Gambar 2.16 menggambarkan hal ini. Desain sirkuit pendingin yang efisien mengurangi waktu pendinginan, pada waktunya sistem pendingin meningkatkan produktivitas secara keseluruhan. Selain itu, pendinginan meningkatkan kualitas bagian dengan mengurangi tegangan sisa dan mempertahankan keakuratan dan stabilitas dimensi (lihat Gambar 2.17).



Gambar 2.16 Siklus waktu pendinginan injection molding (Shoemaker, 2006).

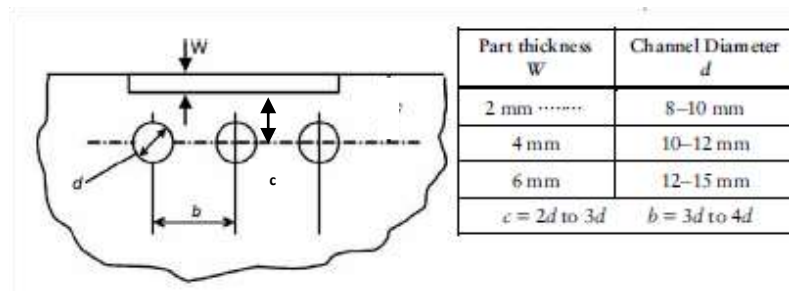


Gambar 2.17 Letak cooling yang efisien (Saut, 2010).

Pendingin cetakan menyumbang lebih dari dua pertiga dari total waktu siklus. Pendinginan yang tepat dan efisien dapat meningkatkan kualitas dan

produktivitas produk. Oleh karena itu adapun tata letak cooling memperhatikan bentuk produk untuk meminimalisasi cacat produk.

Adapun rumus mencari jarak *cooling* dengan produk dan jarak antar *cooling* dapat dilihat pada gambar 2.18 dan keterangan di bawah ini.



Gambar 2.18. perhitungan jarak *cooling* dengan produk dan jarak antar *cooling* (Jones, 2008).

A. Memaksimalkan Nilai Transfer Panas

Dalam konduksi panas *steady*, laju perpindahan panas $\dot{Q}_{conduction}$ sebanding dengan konduktivitas termal k dan gradien suhu cetakan, dT/dz :

$$\dot{Q}_{conduction} = k \frac{dT}{dz} \dots\dots\dots (2.3)$$

Ada dua implikasi dari persamaan ini. Pertama, laju perpindahan panas sebanding dengan konduktivitas termal. Bahan konduktif yang sangat baik seperti Cu 940 atau QC7 memiliki konduktivitas termal yang paling banyak mendekati semua lapisannya, dan seharusnya tidak beroperasi sama sekali lebih cepat. Lembaran tipis yang mengharuskan pengalihan panas, yang mana yang dapat digerakkan ulang dapat meningkat dengan mengganti pendingin kertas ke permukaan rongga cetakan.

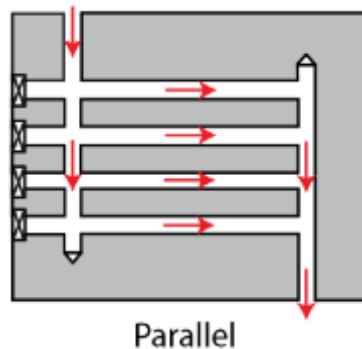
B. Konfigurasi Saluran pendingin

Konfigurasi saluran pendingin dapat berupa rangkaian parallel, seri, dan *buffle* seperti yang dijelaskan dibawah :

- Saluran Pendingin Paralel

Saluran pendingin paralel memiliki karakteristik aliran desain sejajar, laju alir sepanjang berbagai saluran pendinginan akan berbeda

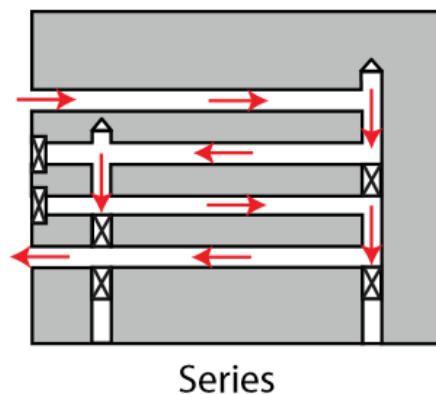
karena masing-masing perbedaan hambatan aliran. Tingkat aliran fluida bervariasi menyebabkan efisiensi perpindahan panas dari saluran pendingin menjadi berbeda dari satu ke yang lain. Akibatnya, pendinginan cetakan tidak akan seragam dengan konfigurasi saluran pendinginan parallel (Shoemaker, 2006). Contoh saluran paralel pada gambar 2.19.



Gambar 2.19. Saluran pendingin paralel (Shoemaker, 2006).

- Saluran Pendingin Seri

Saluran pendingin seri merupakan jenis konfigurasi aliran pendingin paling sering direkomendasikan dan digunakan. Jika saluran pendinginan memiliki ukuran yang sama, pendingin dapat mempertahankan laju alir turbulennya (*full*) dengan seluruh panjangnya. Aliran turbulen memungkinkan panas ditransfer lebih efektif. Namun, Anda harus berhati-hati untuk meminimalkan kenaikan suhu pendingin karena pendingin akan mengumpulkan semua panas sepanjang jalur pendinginan saluran (Shoemaker, 2006). Contoh saluran seri pada gambar 2.20.

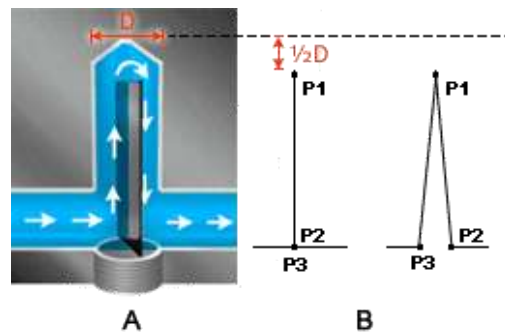


Gambar 2.20 Saluran pendingin seri (Shoemaker, 2006).

- *Baffle*

Bagian dari pendinginan yang mengalihkan aliran pendingin ke daerah yang memerlukan pendinginan. Saluran pendingin normal biasanya dibuat lubang langsung melalui rongga cetakan dan inti cetakan. *Baffle* adalah saluran pendingin yang dibor tegak lurus pada saluran masuk pendingin, dengan bentuk plat pipih yang memisahkan satu saluran pendinginan menjadi dua saluran setengah lingkaran. Air pendingin mengalir di satu sisi plat dari saluran masuk pendinginan, dan diteruskan untuk mengalir ke sisi keluar pendinginan dari baffle (Shoemaker, 2006).

Baffle dimodelkan dengan menciptakan plat dengan celah di atasnya untuk aliran pendinginan. Warna kuning adalah warna default ditetapkan untuk *baffle* pada simulasi moldflow. Dalam gambar 2.8, **A** menunjukkan penampang *baffle* dan **B** menunjukkan representasi model cetakan *baffle* (Autodesk, 2017).



Gambar 2.21. (a) *Baffle* (b) Model cetakan (Autodesk, 2017).

2.2.13. Design Of Experiment

Design of experiment adalah suatu rancangan percobaan (dengan setiap langkah tindakan yang betul-betul terdefiniskan) sehingga informasi yang berhubungan dengan persoalan yang sedang diteliti dapat dikumpulkan. Hal ini dikarenakan *design of experiment* mengumpulkan beberapa faktor dan variabel untuk mendapatkan komposisi parameter yang paling tepat, sehingga dengan menggunakan metode *design of experiment* dan metode taguchi bisa mendapatkan variasi parameter proses yang paling optimal untuk meningkatkan kualitas produk.

A. Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah suatu metode baru dalam bidang ilmu teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu yang bersamaan menekan biaya dari sumber-sumber seminimal mungkin. Metode taguchi berupaya mencapai sasaran itu dengan menjadikan produk atau proses tidak sensitif dengan berbagai faktor seperti misalnya material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional (Soejanto, 2009). Metode Taguchi menggunakan seperangkat matrik khusus yang disebut dengan matrik orthogonal. Matriks standart ini merupakan langkah untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter (Soejanto, 2009).

B. S/N Ratio

Metode Taguchi telah mengembangkan konsep S/N ratio (Signal-to- Noise Ratio) untuk eksperimen yang melibatkan banyak faktor. Rasio S/N diformulasikan untuk peneliti milih nilai level faktor untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Olehkarena metode perhitungan rasio S/N tergantung pada karakteristik kualitas, apakah responnya semakin kecil, semakin baik, semakin besar semakin baik, atau tertuju pada nilai tertentu (Soejanto, 2009). Berikut adalah Rasio S/N menurut tipe karakteristik yang dituju pada penelitian.

1. *Smaller is better* (STB)

Smaller the better atau semakin kecil semakin baik adalah karakteristik kualitas yang secara kontinu, memiliki nilai non-negatif dan nilai terdiri dari nol sampai tak terhingga (∞) dimana pada nilai *defect* atau cacat yang diinginkan adalah nol. Sehingga rasio S/N STB dapat dihitung dengan rumus 2.4.

$$SN_{STB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \dots \dots \dots (2.4)$$

keterangan:

- n : jumlah pengulangan dari suatu percobaan
- yi : data pengamatan ke-i

2. *Larger is better* (LTB)

Larger is better atau semakin besar semakin baik adalah karakteristik kualitas yang secara kontinu, memiliki nilai non-negatif dan nilai terdiri dari nol sampai tak terhingga (∞) dengan nilai target yang diharapkan adalah selain nol atau tertuju pada nilai yang sebesar mungkin. Pada rasio S/N LTB dapat dihitung dengan rumus 2.5.

$$SN_{LTB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \right] \dots \dots \dots (2.5)$$

keterangan:

n : jumlah pengulangan eksperimen

y_i : data pengamatan ke-i

3. *Nominal is best* (N.T.B)

Nominal the best atau tertuju pada nilai tertentu adalah karakteristik kualitas yang secara kontinu, memiliki nilai non-negatif dan nilai terdiri dari nol sampai tak terhingga (∞) dengan nilai target yang diharapkan adalah selain nol dan memiliki bilangan yang terbatas atau tertuju pada nilai tertentu. Sehingga rasio S/N NTB dapat dihitung dengan rumus 2.6.

$$SN_{NTB} = 10 \log_{10} \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \dots \dots \dots (2.6)$$

keterangan:

μ : *mean*

σ : deviasi

C. Analysis of Variance (ANOVA)

Menurut Soejanto, (2009) ANOVA atau analisis varians adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis data yang telah disusun dalam perencanaan eksperimen secara statistika. Analisis ini merupakan teknik yang analisisnya dilakukan dengan menguraikan seluruh varians atas bagian-bagian yang diteliti. Penggunaan ANOVA bertujuan untuk membantu mengidentifikasi kontribusi suatu faktor sehingga dapat diketahui perkiraan akurasi pada suatu model.

Analisis varian pada matriks orthogonal dilakukan dengan perhitungan yang berdasarkan jumlah kuadrat (*sum of square*) pada masing masing-kolom. Rumus perhitungan jumlah kuadrat pada analisis varians adalah sebagai berikut:

1. Jumlah Kuadrat Total (Sq_T)

Sum of Squares total atau jumlah kuadrat total adalah jumlah penyebaran agregat nilai data individu melalui beberapa level faktor berdasarkan data yang diperoleh yang dinyatakan sebagai berikut dalam rumus 2.7.

$$Sq_T = \sum_{i=1}^N y^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

keterangan:

N : jumlah percobaan

y : data yang diperoleh dari percobaan.

2. Jumlah Kuadrat Faktor (Sq_A)

Sum of Squares faktor atau jumlah kuadrat faktor adalah jumlah penyebaran agregat nilai data individu pada level suatu faktor berdasarkan data yang diperoleh yang dinyatakan sebagai berikut dalam rumus 2.8.

$$Sq_A = \left[\sum_{i=1}^{KA} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \dots\dots\dots (2.8)$$

keterangan:

A_i : level ke i pada faktor A

n_{Ai} : jumlah percobaan untuk level ke i pada faktor ke A

3. Jumlah Kuadrat *Error* (Sq_e)

Sum of Squares total faktor atau jumlah kuadrat *error* adalah hasil penjumlahan nilai kuadrat *error* pada lapisan *output* setiap data dan dinyatakan sebagai berikut dalam rumus 2.9.

$$Sq_e = Sq_T - Sq_A \dots\dots\dots (2.9)$$

keterangan:

Sq_T : *Sum of Squares* total

Sq_A : *Sum of Squares* faktor ke A

4. Jumlah Kuadrat Rata-Rata (Sq_m)

Sum of Squares rata-rata atau jumlah kuadrat rata-rata adalah jumlah kuadrat dari nilai rata-rata data yang diperoleh dan dinyatakan sebagai berikut dalam rumus 2.10.

$$Sq_m = n \times \hat{y}^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

keterangan:

n : jumlah percobaan

\hat{y}^2 : rata-rata data hasil percobaan

5. Jumlah Kuadrat Total Faktor (S_t)

Sum of Squares total faktor atau jumlah kuadrat total faktor adalah hasil penjumlahan nilai kuadrat dari semua faktor yang digunakan dan faktor *error*, dinyatakan sebagai berikut dalam rumus 2.11.

$$S_t = Sq_A + Sq_e \dots\dots\dots (2.11)$$

keterangan:

Sq_m : jumlah kuadrat karena rata-rata

Sq_A : jumlah kuadrat karena faktor ke A