

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Rahmanto (2010) melakukan penelitian tentang *shrinkage* pada plastik *bushing* dengan variabel temperatur dan tekanan injeksi plastik. Berdasarkan penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa *Polycarbonate* (PC) dalam proses injeksi plastik, variasi temperatur yaitu 250, 270, 280, 290, 300, 310 dan 320<sup>0</sup>C dengan tekanan 100 kg/cm<sup>2</sup>. Temperatur dalam injeksi ini merupakan temperatur yang digunakan untuk mencetak material kedalam rongga cetakan. Temperatur harus dijaga lebih dari cukup agar dapat meminimalkan *shrinkage*. Cacat *sink mark* juga dapat diminimalkan dengan menambahkan tekanan injeksi dan menyesuaikan temperatur. Pada temperatur 250<sup>0</sup>C terjadi penyusutan yang besar sekali yaitu 14,17%, temperatur yang sesuai untuk bahan *polycarbonate* adalah 300<sup>0</sup>C. Sedangkan temperatur lebih dari 300<sup>0</sup>C pada material cetakan terjadi warna kekuning-kuningan atau agak terbakar.

Riaz dkk (2013) telah melakukan penelitian tentang pengaruh temperatur dan tekanan *injection molding* terhadap produk polikarbonat. Dengan variasi temperatur 210<sup>0</sup>C, 230<sup>0</sup>C, 250<sup>0</sup>C, dan 270<sup>0</sup>C serta variasi pada tekanan 80 bar, 100 bar, 120 bar, dan 140 bar. Berdasarkan dari penelitiannya tersebut dapat disimpulkan bahwa pengaturan variasi temperatur yang optimal pada mesin *injection molding* yaitu dengan menggunakan temperatur 250<sup>0</sup>C, tekanan injeksi 140 bar.

Pujari dkk (2015) melakukan penelitian tentang optimalisasi parameter dan meminimalisasi cacat dengan menerapkan metode Taguchi dan  *moldflow* untuk komponen *injection molding*. Berdasarkan dari hasil penelitiannya urutan ikatan simulasi yang berpengaruh dari perbedaan parameter proses *molding* untuk cacat permukaan *sink mark* seperti tekanan tahan, temperatur leleh, waktu pendinginan,

dan tekanan injeksi. Akan tetapi waktu tahan adalah yang paling berpengaruh untuk kecacatan *sink mark*. Kombinasi parameter yang optimal dari beberapa faktor yang berbeda perlu di pertimbangkan yaitu temperatur leleh 235<sup>0</sup>C, tekanan injeksi 80 bar, tekanan tahan 55 bar dan waktu pendinginan 50 detik yang dapat menghasilkan cacat *sink mark* sebesar 2.674/0,2 % yang mana data terbaik dari komparasi kombinasi parameter yang lain.

Krache dkk (2011) melakukan penelitian tentang sifat mekanis pada material campuran PC/ABS dengan variasi 90/10, 80/20, 70/30, dan 60/40. Pada variasi 90/10 menghasilkan nilai tegangan tarik 56 MPa, nilai *elongation* 7%, dan nilai modulus elastisitas 1780 MPa, pada variasi 80/20 menghasilkan nilai tegangan tarik 45 MPa, nilai *elongation* 6%, dan nilai modulus elastisitas 1760 MPa, pada variasi 70/30 menghasilkan nilai tegangan tarik 42 MPa, nilai *elongation* 3,5%, dan nilai modulus elastisitas 1730 MPa, dan pada variasi 60/40 menghasilkan nilai tegangan 40 MPa, nilai *elongation* 3%, dan nilai modulus elastisitas 1700 MPa. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan nilai *tensile strength* yang paling tinggi di dapat 56 MPa, nilai *elongation* di dapat 7%, dan nilai modulus elastisitas 1780 MPa. pada material campuran plastik PC 90% dan ABS 10%. Semakin banyak material polikarbonat pada campuran PC/ABS maka nilai kekuatan tarik yang didapat akan semakin tinggi.

Rishi dkk (2013) melakukan penelitian tentang *optimization of injection molding process using taguchi and ANOVA*. Hasil dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa dalam proses pencetakan *injection molding* berbahan Polikarbonat, untuk kekuatan tarik suhu leleh menjadi faktor yang paling signifikan dalam memberikan kontribusi sebesar 64,55% diikuti oleh waktu pendinginan 08,54% dan tekanan injeksi 07,19%. Hasilnya menunjukkan bahwa, untuk polikarbonat kombinasi terbaik untuk parameter pengolahan dalam hal kekuatan tarik adalah suhu leleh 260<sup>0</sup>C, tekanan injeksi 150 bar dan 7,5 detik waktu pendinginan.

Aplikasi penggunaan untuk metode taguchi pada optimalisasi parameter *injection molding* untuk manufaktur produk dari campuran plastik telah dilakukan

agar dapat meningkatkan kualitas karakteristik dari *shrinkage*, dengan menggunakan metode analisis *orthogonal array* (OA), *rasio signal to noise* (S/N), dan variasi ANOVA persentase *shrinkage* dapat dianalisis. Dari hasil penelitian yang dilakukan menghasilkan bahwa kombinasi parameter proses yang optimal adalah temperatur leleh yang rendah, tekanan injeksi yang tinggi, tekanan *holding* rendah, waktu *holding* yang lama, dan waktu pendinginan yang lama (Kamarudin et al., 2010).

Berdasarkan tinjauan pustaka diatas, parameter proses yang berpengaruh signifikan untuk mengurangi persentase *shrinkage* dan pengaruh terhadap kekuatan sifat mekanis dari spesimen polikarbonat adalah temperatur leleh, *holding pressure*, *holding time* dan *cooling time*. Oleh karena itu penelitian tentang pengaturan variasi parameter perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari variasi parameter terhadap produk plastik. Dan pada penelitian ini hasil uji impact dan uji tarik dianalisa menggunakan menggunakan metode *design of experiment* Taguchi SNR dan ANOVA.

## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Plastik *Polycarbonate* (PC)**

*Polycarbonate* (PC) adalah salah satu plastik rekayasa penting dengan penggunaan diberbagai aplikasi karena sifat mekanik yang sangat baik, kekuatan benturan tinggi, tahan panas dan modulus elastisitas tinggi, serta keseimbangan ketangguhan, kejernihan dan transparansi serta polikarbonat merupakan suatu kelompok dari polimer termoplastik *amorf* yang mudah di bentuk dengan menggunakan temperatur panas yang tinggi. Plastik jenis ini banyak digunakan dalam industri kimia untuk saat ini. Polikarbonat memiliki sifat *impact strength* yang tinggi, ketahanan termal, tahan terhadap benturan, mudah diproses, dan sangat benig. Dalam identifikasi plastik, polikarbonat berada pada nomor 7 (other). Material polikarbonat terdiri dari polimer dengan gugus karbonat (-O-(C=O)-O-) dalam rantai molekuler yang panjang. Polikarbonat terbuat dari reaksi kondensasi *bisphenol A* dengan *fosgen* dalam alkali.

Untuk menghasilkan produknya melalui proses dengan tehnik pengolahan thermoplastik pada umumnya, yaitu dengan cara: cetak injeksi, ekstruksi, cetak tiup, dan *structural foam moulding*. Sheet polikarbonat dapat diproses dengan tehnik *thermoforming* menggunakan tekanan maupun vakum. *Polycarbonate* (PC) juga dapat dikenai proses *finishing* meliputi pelarut dan *adhesive bonding*, pengecatan, *printing*, *hot stamping*, *ultrasonic welding*, dll.

Penggunaan material berbahan *polycarbonate* (PC) pada berbagai aplikasi sangat luas, antara lain:

1. Sektor otomotif: *Polycarbonate* memberikan *performance* tinggi pada lensa lampu depan/belakang. *Polycarbonate 'opaque grade'* digunakan untuk lampu rumah dan komponen elektrik. '*Glass reinforced grade*' digunakan untuk grill.
2. Sektor makanan: *Polycarbonate* digunakan untuk tempat minuman, mangkuk pengolah makanan, alat makan atau minum, alat masak *microwave* dan khususnya yang memerlukan produk yang jernih.
3. Bidang medis: *Polycarbonate* digunakan pada *filter housing*, *tubing connector* dan peralatan operasi yang harus disterilisasi.
4. Industri elektrikal: *Polycarbonate* digunakan untuk membuat konektor, pemutus arus, tutup baterai dan 'light concentrating panels' untuk display kristal cair.

WONDERLITE® adalah merupakan merek bahan termoplastik dari perusahaan *Chi Mei Corporation* (Taiwan) yang memproduksi resin *Polycarbonate* terbesar di Asia Tenggara. Material plastik resin *PC type Wonderlite 110* memiliki sifat tahan terhadap panas yang tinggi dan *impact strength* tinggi. Material ini juga dapat diaplikasikan sebagai produk seperti listrik, elektronik, komponen otomotif, barang olahraga, dan produk kebersihan sanitasi (Chi Mei Corporation Taiwan,2012).

Tabel 2. 1 Data sheet material PC resin produk CHI MEI

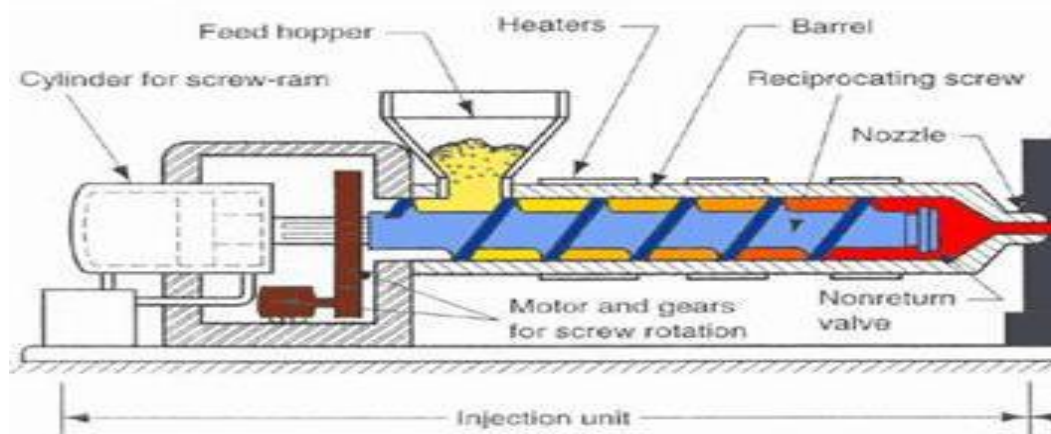
| Properties                              | ISO Test Method | Test Condition     | Unit              | PC-110                   |
|---|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------------|
| Melt Flow Index                         | 1133            | 300°C × 1.2KG      | ml/10 min         | 10                       |
| Mass Density                            | 1183            | 23 °C              | g/cm <sup>3</sup> | 1.2                      |
| Tensile Strength                        | 527             | 50 mm/min, field   | MPa               | 66                       |
|   |                 | 50 mm/min, break   | MPa               | 75                       |
| Tensile Elongation                      | 527             | 50 mm/min          | %                 | 120                      |
| Flexural Strength                       | 178             | 2 mm/min           | MPa               | 90                       |
| Flexural Modulus                        |                 | 2 mm/min           | GPa               | 2.4                      |
| Izod Impact Strength                    | 180/4A          | 23 °C Notched      | KJ/m <sup>2</sup> | 75                       |
|   |                 | -30 °C Notched     | KJ/m <sup>2</sup> | -                        |
| Charpy Impact Strength                  | 179             | 23 °C Notched      | KJ/m <sup>2</sup> | 75                       |
|   |                 | -30 °C Notched     | KJ/m <sup>2</sup> | -                        |
| Vicat Softening Temp.                   | 306             | 1 Kg, 60 °C/hr     | °C                | 150                      |
|   |                 | 5 Kg, 60 °C/hr     | °C                | 145                      |
| Heat Distortion Temp.                   | 75/A            | 1.8 MPa Unannealed | °C                | 128                      |
|   |                 | 1.8 MPa Annealed   | °C                | 143                      |
| Coefficient of Linear Thermal Expansion | 11359           | -                  | -                 | 6.0~8.0x10 <sup>-5</sup> |
| Flammability                            | -               | UL-94              | -                 | 2.5mm V-2                |
| Mold Shrinkage                          | 294-4           | -                  | %                 | 0.5~0.7                  |
| Symbol                                  | 1043            | -                  | -                 | >PC<                     |

January 16, 2017

### 2.2.2 Bagian – Bagian Mesin *Injection Molding* dan Fungsinya

Metode *Injection Molding* adalah proses pembentukan benda kerja dari material *compound* berbentuk butiran yang ditempatkan kedalam suatu *hopper* dan masuk ke dalam silinder injeksi yang kemudian didorong melalui *nozzle* dan *sprue bushing* ke dalam *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 memanas lagi bila didinginkan. Perubahan material *thermoplast* 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<sup>0</sup>C sampai 274<sup>0</sup>C atau sesuai rekomendasi dari manufaktur pembuat material plastik. Semakin panas suhu yang digunakan maka, material akan semakin encer (rendah viskositasnya) sehingga akan memudahkan diinjeksi ke dalam  *mold*. Setiap material memiliki karakter suhu *molding* ( *mold flow index*). Semakin lunak formulasinya, yang berarti kandungan plastis tinggi sehingga

mempunyai temperatur yang rendah, dan sebaliknya semakin keras formulasinya akan membutuhkan temperatur tinggi.



Gambar 2. 1 Bagian mesin *injection molding*

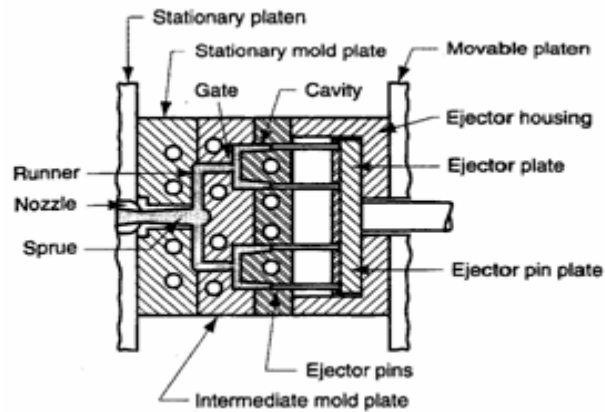
Mesin *injection molding* terdiri dari banyak komponen yang tersusun didalamnya. Secara umum komponen utama dari mesin *injection molding* dapat dibagi menjadi:

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*. Kemudian dalam  *injection unit* akan terjadi perubahan bentuk material dari padat menjadi cair. Hal ini agar material dapat dibentuk sesuai dengan konstruksi  *mold* yang digunakan.

b. *Mold Unit*

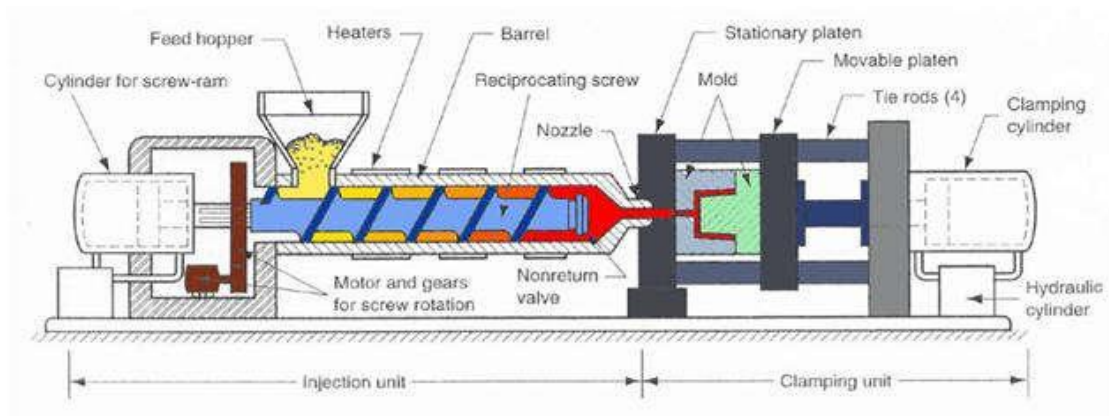
*Mold unit* merupakan bagian lain dari mesin plastik  *injection* dan  *molding unit* adalah bagian yang membentuk benda yang akan dibuat, secara garis besar  *molding unit* memiliki 2 bagian utama yaitu bagian  *cavity* dan  *core*, bagian  *cavity* adalah bagian cetakan yang berhubungan dengan  *nozzle*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



Gambar 2. 2 *Mold unit* (Sinotech.com)

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* terdapat gaya yang dipergunakan untuk menahan tekanan injeksi pada saat proses atau siklus injeksi berlangsung dan pada *clamping unit* juga bisa mengatur berapa panjang gerakan *molding* saat di buka dan berapa panjang *ejector* harus bergerak.



Gambar 2. 3 Bagian-bagian plastik *injection machine* (*How to make injection molds*, Manges, 2001)

Mesin produk plastik *injection molding* memiliki beberapa bagian, yaitu:

a) *Motor dan Transmission Gear Unit*

Bagian ini berfungsi untuk menghasilkan daya yang digunakan untuk memutar *screw* pada *barrel*, sedangkan *transmission gear unit* berfungsi untuk

memindahkan daya dari putaran *motor* ke dalam *screw*, selain itu *transmission gear unit* juga memiliki berfungsi untuk mengatur tenaga yang disalurkan sehingga tidak terjadi pembebanan yang terlalu besar.

b) *Cylinder Screw Raw*

Bagian ini berfungsi untuk mempermudah gerakan *screw* dengan menggunakan momen *inersia* dan juga menjaga perputaran *screw* tetap konstan, sehingga dapat menghasilkan kecepatan dan tekanan yang konstan pada saat melakukan proses plastik *injection molding*.

c) *Hopper*

*Hopper* merupakan tempat untuk menempatkan material plastik sebelum masuk ke *barrel*. Alat ini digunakan biasanya untuk menjaga kelembapan material plastik karena apabila kandungan air terlalu besar pada udara dapat mengakibatkan hasil dari proses injeksi tidak optimal.

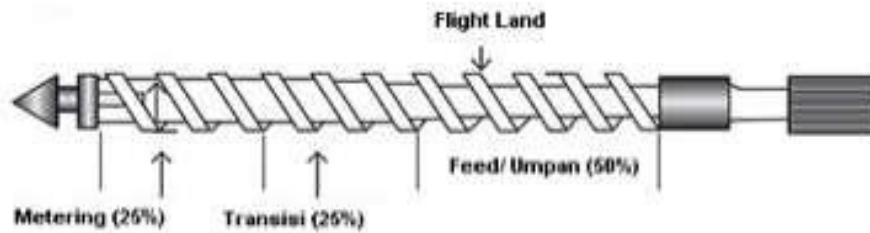
d) *Barrel*

*Barrel* merupakan tempat dimana *screw* dan selubung yang menjaga aliran plastik ketika akan dipanaskan oleh *heater*. Fungsi *heater* disini adalah untuk memanaskan plastik sebelum masuk ke dalam *nozzle*.

e) *Screw*

*Screw* berfungsi untuk mengalirkan plastik dari *hopper* ke *nozzle*. Material dari *hopper* akan tertarik mengisi *screw* ketika *screw* berputar dan selanjutnya akan dipanaskan lalu didorong ke arah *nozzle*. *Screw* pada *barrel* memiliki standard *screw* dengan 3 zona yaitu zona pengisian, zona kompresi, dan zona pengisian. Zona transisi (kompresi) dimana area ini merupakan tempat butiran material plastik meleleh. Energi yang dibutuhkan untuk melelehkan plastik dari pergeseran (*friksi*) dan kompresi yang berasal dari putaran *screw*.





Gambar 2. 4 Standar *screw* dengan 3 zona (Yuswinanto, 2016)

f) *Nonreturn Valve*

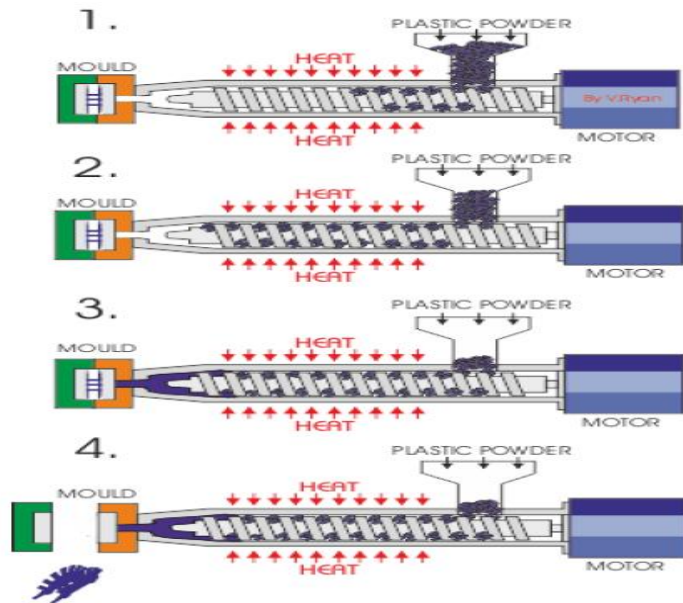
*Valve* berfungsi untuk menjaga aliran plastik yang telah meleleh agar tidak kembali saat *screw* berhenti berputar.

g) *Nozzel*

*Nozzle* berfungsi sebagai penghubung antara *mold* dengan unit injeksi, penahan kebocoran/*sealing*, dan penyempitan pada *nozel* untuk mempertinggi kecepatan yang akan dihasilkan.

### 2.2.3 Proses dalam *Injection Molding*

Proses dalam injeksi dimulai dari plastik dalam material berbentuk butiran atau bubuk yang ditampung dalam sebuah *hopper* (tempat penampungan plastik pada mesin yang berfungsi sebagai input material) kemudian turun kedalam *barrel* secara otomatis (karena gaya gravitasi) dimana material plastik dilelehkan oleh pemanas yang terdapat di dinding barel dan oleh gesekan akibat perputaran *screw* injeksi. Kemudian material plastik akan dicairkan di dalam *barrel* oleh pemanas atau *heater* dengan suhu yang sudah disesuaikan. Material plastik akan mencair dan siap diinjeksi kedalam cetakan, sebelum proses injeksi *mold* akan menutup dengan tekanan tertentu dan cairan plastik diinjeksikan kedalam cetakan atau *mold*, kemudian terjadi proses *holding* untuk menyempurnakan produk dan menahan tekanan balik, setelah itu terjadi proses *charging* dan *cooling* yang berguna untuk pengisian material dan pendinginan produk plastik yang berada pada cetakan. Produk plastik yang sudah didinginkan akan dikeluarkan oleh *ejector* setelah cetakan atau *mold* membuka (Wijaya,2009).



Gambar 2. 5 Prinsip kerja mesin *injection molding* (Technologystudent.com)

#### 2.2.4 Spesimen *Multipurposes*

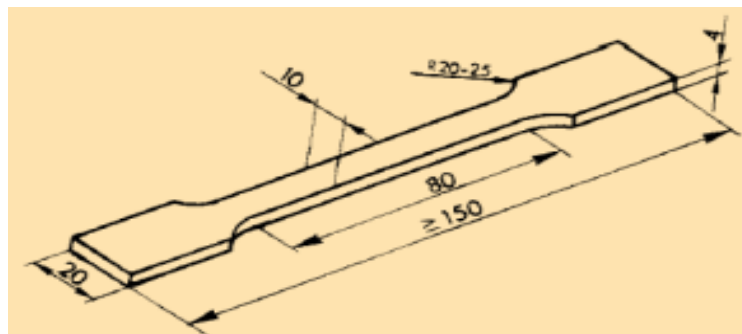
Spesimen *Multipurpose* merupakan spesimen yang digunakan sebagai standar peneliti dibidang teknik. Pada penelitian ini menggunakan spesimen ISO 294-1 (2012) yang berukuran sebagai berikut:

Panjang Keseluruhan : 150 mm

Panjang *Gauge* : 80 mm

Tebal : 4 mm

Lebar : 20 mm



Gambar 2. 6 Bentuk dan ukuran spesimen *multipurpose*

(Sumber: Standar ISO 294-1)

### 2.2.5 Parameter Proses *Injection Molding*

Parameter yang digunakan dalam proses *injection molding* untuk menghasilkan suatu produk dengan kualitas yang optimal sangat bervariasi, karena beberapa pengaturan parameter yang akan mempengaruhi hasil dari proses produksi plastik melalui metode *injection molding* akan berpengaruh pada kualitas produk plastik (Wijaya, 2009). Adapun parameter-parameter yang berpengaruh untuk mengurangi persentase cacat *shrinkage* adalah :

a. Temperatur Leleh ( *melt temperature* )

*Melt temperature* adalah batas temperatur dimana bahan plastik mulai meleleh apabila diberikan energi panas/perlakuan panas.

b. Waktu Penekanan ( *holding time* )

Waktu penekanan adalah durasi atau lamanya waktu yang diperlukan untuk memberikan tekanan pada *piston* yang mendorong cairan plastik. Semakin besar ukuran cetakan maka waktu penekan yang diperlukan akan semakin lama.

c. Waktu Pendinginan ( *cooling time* )

*Cooling time* adalah waktu pendinginan setelah cairan material plastik diinjeksikan ke dalam cetakan.

d. Tekanan Injeksi ( *injection pressure* )

Tekanan injeksi ini merupakan tekanan yang digunakan untuk menginjeksi cairan plastik kedalam cetakan. Tekanan ini dipengaruhi oleh luas proyeksi benda dan gaya yang dibutuhkan.

e. Tekanan Balik ( *back pressure* )

*Back pressure* adalah tekanan yang dilakukan untuk menahan mundurnya *screw* dalam keadaan berputar saat pengambilan material atau proses *plastizing* yang berfungsi untuk *mixing* material dan menghilangkan udara yang ikut ketika proses *charging*

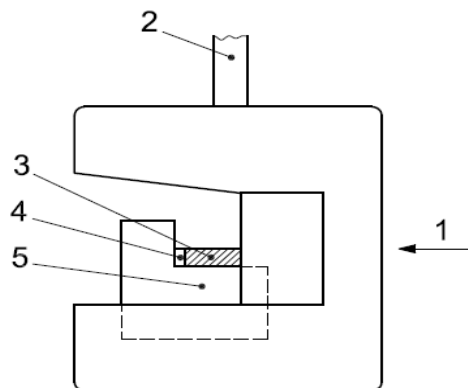
### 2.2.6 Sifat Mekanis Material

Sifat mekanis material merupakan kemampuan suatu bahan untuk menerima beban maupun energi serta gaya tanpa menimbulkan kerusakan,

ketelitian dan memperoleh hasil yang sesuai dengan standar tertentu. Sehingga dapat menghasilkan produk yang berkualitas serta dapat dijadikan produk masal. Produk dikatakan berkualitas setelah dilakukan beberapa pengujian mekanis seperti pengujian sebagai berikut:

**a. Uji Impak ( *Impack Test* )**

Uji impak adalah pengujian material untuk mendapatkan kualitas ketahanan terhadap beban kejutan, mengetahui sifat liat, dan mengetahui energi yang dibutuhkan pada saat mematahkan batang spesimen dalam sekali pukul. Adapun metode pengujian impak terdapat dua model yaitu metode *charpy* dan metode *Izod* dengan takikan maupun tanpa takikan pada spesimen yang disesuaikan dengan standar pengujian bahan tersebut. Pada pengujian ini penulis menggunakan standar ISO 179-1. Tipe pengujian menggunakan *edgewise* (Gambar 2.7) dan spesimen diberi takikan di bagian tengah sedalam 0,25 mm Vnotch atau menggunakan *type A* (Gambar 2.9) sebagai standar dalam pengujian. Pada uji impak spesimen ini menggunakan metode *charpy* dengan bentuk takikan V (*V-notch*) (Gambar 2.8) dan tanpa takikan.

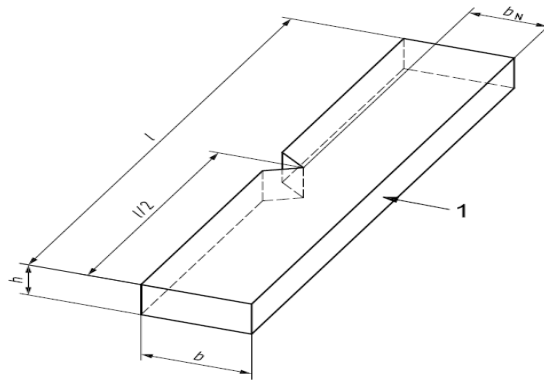


Gambar 2. 7 Tipe pengujian *edgewise*  
(Standar ISO 179-1)

Keterangan gambar :

- |                    |            |
|--------------------|------------|
| 1. Arah pukulan    | 4. Takikan |
| 2. Batang pendulum | 5. Tumpuan |

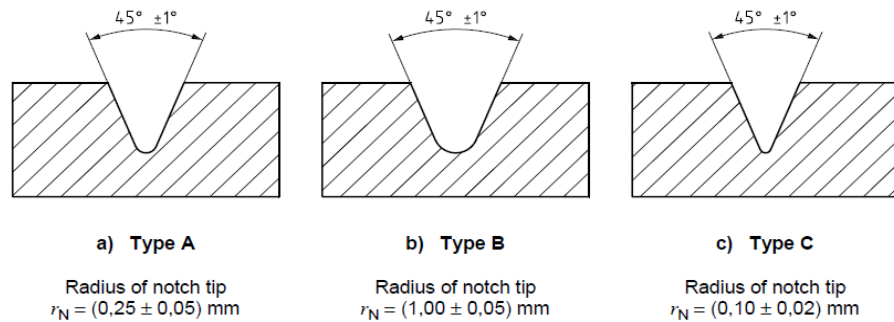
3. Letak spesimen



Gambar 2. 8 Metode takikan V notch

(Sumber: Standar ISO 179)

Adapun bentuk macam-macam kedalaman takikan yang bervariasi seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Bentuk variasi kedalaman takikan (Sumber ISO 179)

1. Luas Penampang

Luas Penampang merupakan suatu bagian spesimen yang diukur setelah pengujian. Persamaannya antarlain :

$$A = L \times T \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

A = Luas patahan (mm<sup>2</sup>)

L = Lebar spesimen (mm)

T = Tebal spesimen (mm)

2. Energi yang di serap

Selain luas penampang pengujian impak ini juga dapat mengetahui berapa energi yang diserap oleh spesimen. Persamaannya antarlain:

$$E = M \cdot g \cdot (h-h') \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

E = Energi (joule)

M = Massa pendulum (kg)

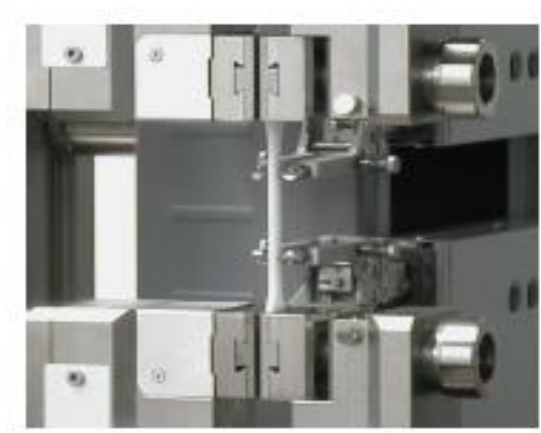
h = Tinggi jatuh (m)

h' = Tinggi ayun (m)

**b. Uji Tarik ( *Tensile Test* )**

Uji tarik adalah pengujian material yang mendasar untuk mengetahui sifat yang ada pada suatu spesimen yaitu seberapa besar spesimen bekerja terhadap kekuatan tarik dan seberapa besar spesimen menjadi panjang setelah menerima pembebanan sebanding atau sama besar pada sumbu kedua spesimen tersebut. Dalam pengujian ini penulis menggunakan standar ISO 527-1 (Gambar 2.10).

Menurut Hukum Hooke (Hooke's laws) bahwa pada uji tarik dikatakan daerah linier yaitu hubungan perbandingan lurus antara besarnya gaya yang diperoleh dengan perbedaan panjang spesimen setelah ditarik. Perbandingan nilai tegangan dengan nilai regangan menghasilkan nilai yang konstan. Adapun rumus dari pengujian tarik adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 10 Pengujian Tarik ISO 527-1 (*Injeksi Molding*)

(Sumber: Standar ISO 527)

### 1. Tegangan Tarik

Tegangan tarik dapat dihasilkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan tarik (MPa)

F = Beban tarik maksimum (N)

A = Luas penampang (mm<sup>2</sup>)

### 2. Regangan

Besarnya regangan tarik dihasilkan dari pembagian perpanjangan (*gauge length*) dengan panjang awal. Besar regangan dapat dirumuskan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

$\varepsilon$  = Regangan (mm)

$\Delta L_0$  = Perubahan panjang keseluruhan (mm)

$L_0$  = Panjang awal (mm)

### 3. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas dapat dihasilkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon * A} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$E = \frac{\Delta F}{(L_0 - \Delta L_0) * A} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

E = Modulus elastisitas (MPa)

- $\Delta F$  = Perubahan beban (N)
- $\Delta \epsilon$  = Perubahan panjang (mm)
- $L_0$  = Perubahan panjang awal (mm)
- $\Delta L_0$  = Perubahan panjang akhir (mm)
- $A$  = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )

### 2.2.7 Design of Experiment (DOE)

*Design of experiment* atau DOE adalah suatu rancangan percobaan yang didefinisikan pada setiap langkah dan tindakan dengan benar-benar untuk mengumpulkan informasi yang berhubungan dengan persoalan yang sedang diteliti. Proses desain eksperimen bertujuan sebagai langkah awal yang perlu diambil sebelum eksperimen dilakukan supaya data yang semestinya dapat diperoleh. Pada desain percobaan informasi yang sebanyak-banyaknya diperoleh atau dikumpulkan kemudian digunakan selama proses penelitian. Ada beberapa jenis dari desain percobaan antara lain desain pra-eksperimental, desain eksperimental semu dan desain percobaan. Dalam penggunaan metode DOE proses desain rancangan dapat dibantu oleh *software* seperti Minitab.

### 2.2.8 Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah suatu metodologi pada bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dengan secara bersamaan untuk menekan biaya dan sumber-sumber sekecil mungkin. Metode Taguchi bertujuan untuk mencapai suatu sasaran tersebut dengan menjadikan produk atau proses yang tidak sensitif dengan berbagai faktor seperti material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional (Soejanto, 2009:273). Metode Taguchi memperkenalkan pendekatan dengan menggunakan pendekatan desain eksperimen yang berguna untuk:

1. Merancang suatu produk/merancang proses sehingga kualitasnya kokoh terhadap kondisi lingkungan.
2. Merancang/mengembangkan produk sehingga kualitasnya kokoh terhadap variasi komponen.
3. Meminimalkan variasi di sekitar target.



Metode Taguchi mempunyai beberapa keunggulan yaitu desain eksperimen Taguchi lebih efisien karena memungkinkan untuk melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor. Desain eksperimen Taguchi memiliki suatu proses yang menghasilkan produk konsisten dan kokoh terhadap faktor yang sulit dikontrol. Metode Taguchi juga menghasilkan faktor yang mengenai respon yang optimal.

Metode Taguchi juga mempunyai kekurangan dari metode yang lain diantaranya yaitu metode ini mempunyai struktur yang kompleks. Untuk mengatasi kekurangan itu diperlukan rancangan percobaan yang lebih hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Metode Taguchi menggunakan seperangkat matriks khusus yang disebut Matriks orthogonal. Matriks standar ini merupakan langkah untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin semua faktor yang mempengaruhi parameter (Soejanto, 2009:17).

### 2.2.9 SNR (*Signal to Noise ratio*)

Metode Taguchi telah mengembangkan konsep SNR (*Signal to Noise ratio*) untuk eksperimen yang melibatkan banyak faktor. SNR diformulasikan untuk memilih nilai level faktor untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Oleh karenanya metode perhitungan SNR tergantung pada karakteristik kualitas, apakah respon semakin kecil, semakin baik, semakin besar semakin baik, atau tertuju pada nilai tertentu (Soejanto, 2009: 141). Berikut adalah Rasio S/N menurut tipe karakteristik yang dituju pada penelitian.

#### 1. *Smaller is better* (S.T.B)

*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 ( $\infty$ ) dimana pada nilai *defect* atau cacat yang diinginkan adalah nol. Sehingga SNR STB dapat dihitung dengan rumus 2.7 sebagai berikut:

$$SN_{STB} = - 10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \dots\dots\dots (2.7)$$

keterangan:

n : jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y<sub>i</sub> : data pengamatan ke-i

2. *Larger is better* (L.T.B)

*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 ( $\infty$ ) dengan nilai target yang diharapkan adalah selain nol atau tertuju pada nilai yang sebesar mungkin. Pada SNR LTB dapat dihitung dengan rumus 2.8 sebagai berikut:

$$SN_{LTB} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \dots \dots \dots (2.8)$$

keterangan:

n : jumlah pengulangan eksperimen

y<sub>i</sub> : 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 ( $\infty$ ) dengan nilai target yang diharapkan adalah selain nol dan memiliki bilangan yang terbatas atau tertuju pada nilai tertentu. Sehingga SNR NTB dapat dihitung dengan rumus 2.9 sebagai berikut:

$$SN_{NTB} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \dots \dots \dots (2.9)$$

keterangan:

$\mu$  : *mean*

$\sigma$  : deviasi

### 2.2.10 *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 *orthogonal array* 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 2.10 sebagai berikut:

$$Sq_T = \sum_{i=1}^N y^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

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 2.11 sebagai berikut:

$$Sq_A = \left[ \sum_{i=1}^{KA} \left( \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \dots\dots\dots (2.11)$$

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 2.12 sebagai berikut:

$$Sq_e = Sq_T - Sq_A \dots\dots\dots (2.12)$$

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 2.13 sebagai berikut:

$$Sq_m = n \times \hat{y}^2 \dots\dots\dots (2.13)$$

keterangan:

- n : jumlah percobaan
- y : rata-rata data hasil percobaan

### 5. Jumlah Kuadrat Total Faktor (St)

*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 2.14 sebagai berikut:

$$S_t = Sq_A + Sq_e \dots\dots\dots (2.14)$$

keterangan:

- Sq<sub>m</sub> : jumlah kuadrat karena rata-rata
- Sq<sub>A</sub> : jumlah kuadrat karena faktor ke A

### 2.2.11 Persen Kontribusi

Persen kontribusi merupakan porsi masing-masing faktor dan atau interaksi faktor yang signifikan terhadap total varian yang diamati. Persen kontribusi ini merupakan fungsi dari *sum of squares* dari masing-masing faktor signifikan yang merupakan indikasi kekuatan sebuah faktor atau interaksi faktor.

Rumus perhitungan persen kontribusi adalah sebagai berikut perhitungan 2.15:

$$Sq'_A = SS_A - (Mqe \times DfA) \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\rho = \frac{Sq'_A}{S_t} \times 100\% \dots\dots\dots (2.16)$$

keterangan:

- Sq'<sub>A</sub> : jumlah kuadrat murni untuk faktor A
- Sq<sub>A</sub> : *sum of squares* faktor A
- Mqe : mean squares error
- DfA : derajat kebebasan faktor A
- S<sub>t</sub> : *sum of squares* total faktor
- ρ : persen kontribusi

Jika persen kontribusi *error*  $\leq 15\%$  maka berarti tidak ada faktor berpengaruh yang diabaikan. Tetapi jika persen kontribusi *error*  $\geq 50\%$  artinya bahwa terdapat faktor berpengaruh diabaikan dan terdapat nilai *error* pada percobaan yang terlalu besar (Soejanto, 2009: 30).