

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Tymark dkk, (2014) melakukan penelitian pada *tensile strength* dan *elastic modulus* dari produk hasil pencetakan dengan menggunakan kondisi lingkungan bagi pengguna umum 3D *printing open-source*. Untuk menentukan sifat mekanik dan variabilitas dari produk 3D *printing* digunakan parameter pencetakan dan *slicing* yang berbeda. Penelitian tersebut mempelajari hubungan antara orientasi pencetakan dan *layer hight* terhadap kekuatan tarik, regangan tarik dan modulus elastisitas. Bahan yang digunakan untuk filamen adalah PLA dan ABS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan 3D *printing open-source* jenis RepRap memiliki biaya proses produksi yang lebih murah, dan dapat berfungsi secara baik pada kualitas sifat mekanik produk dalam aplikasi seperti yang dilakukan industri.

Vicente dkk, (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter *infill* terhadap kuat tarik pada produk 3D *printing* menggunakan filamen ABS. Dalam penelitian tersebut zona *infill* dilakukan modifikasi. Parameter yang dievaluasi dalam penelitian ini adalah parameter kepadatan (*density*) dan pola *infill (infill pattern)*. Pada parameter proses *infill density* diterapkan tiga level untuk dievaluasi yaitu 20%, 50%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kepadatan yang sama, pola sarang lebah (*honeycomb*) memiliki kekuatan tarik yang lebih baik, walaupun perbedaan antar parameter pola kurang dari 5%. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh variasi jumlah plastik yang diekstrusi untuk setiap pola. Hal ini berdampak pada ikatan antar lapisan menjadi sangat berbeda antara pola sarang lebah dan bujur sangkar (*rectilinear*). Pada kasus tersebut dapat menjelaskan sebab terjadinya perbedaan pada modulus elastisitas. Namun penelitian lebih lanjut mengenai topik tersebut perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh parameter *infill* secara mendalam.

Sukindar dkk, (2017) melakukan penelitian menggunakan 3D *printing open source* yang dikembangkan oleh perangkat lunak Repetier-Host dengan bahan PLA dan variasi tiga level untuk tiga parameter meliputi ketebalan lapisan (0.2 mm, 0.3

mm, 0.4 mm), ketebalan *shell* (0.4 mm, 0.8 mm, 1.2 mm), dan kecepatan cetak (30 mm/s, 60 mm/s, 90mm/s). Tiga parameter telah dianalisis dengan menggunakan analisis variasi (ANOVA) dan ketebalan *shell* menunjukkan parameter yang paling dominan dari dua parameter lainnya. Spesimen dengan tebal *layer* 0.3 mm, tebal *shell* 1.2 mm dan kecepatan cetak 30 mm/s memberikan kekuatan tarik tertinggi dengan nilai 33,06 MPa. Hasil dari ANOVA menunjukkan bahwa ketebalan *shell* memberikan hasil yang signifikan ( $p = 0,037$ ) dalam mempengaruhi hasil uji kekuatan tarik. Sedangkan untuk kecepatan cetak ( $p = 0,393$ ) dan ketebalan *shell* ( $p = 0,418$ ) tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik. Hal ini membuktikan bahwa dengan peningkatan ketebalan *shell* dari 0.4 mm menjadi 1.2 mm akan meningkatkan kekuatan tarik spesimen.

Tanoto dkk, (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh perbedaan orientasi pada FDM polimer ABS pada waktu proses, akurasi dimensi, dan kekuatan tarik. Penelitian ini mempelajari hubungan antara parameter proses mesin 3D *printing* dengan menggunakan teknologi FDM dan respon yang dihasilkan. Tiga orientasi yang berbeda dalam pencetakan polimer ABS adalah XY (orientasi pertama), YX (orientasi kedua), dan ZX (orientasi ketiga). Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pencetakan dengan orientasi ketiga adalah proses pencetakan tercepat diikuti oleh orientasi satu dan dua. Pada penyimpangan ukuran ketebalan spesimen terkecil dari standar ukuran pada dimensi lebar adalah orientasi pertama (0.13 mm). Pada uji tarik menunjukkan pencetakan dengan ketiga orientasi tersebut menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada sampel dari deposisi orientasi kedua, yaitu 7,66 MPa diikuti oleh produk orientasi pertama dan ketiga, yaitu 6,8 MPa dan 3,31 MPa.

Tontowi dkk, (2017) melakukan penelitian tentang optimalisasi parameter proses 3D *printing* untuk meningkatkan kualitas produk dengan bahan *polylactic acid* (PLA). Pada penelitian ini terdapat tiga parameter proses yang digunakan meliputi *layer height* (0.05, 0.1 dan 0.15 mm), *temperature nozzle* (195, 200 dan 205 ° C) dan sudut *raster* (-45°, 0°, dan 60°) dimana digunakan analisis metode Taguchi dan *Response Surface Method*. Metode taguchi yang digunakan adalah *array ortogonal* (OA) L9 dengan 3 level dan diasumsikan bahwa setiap parameter

memiliki efek independen atau tidak ada efek interaksi satu sama lain. Analisis respon optimum yang dilakukan menggunakan SNR (*Signal to Noise Ratio*) menunjukkan bahwa terdapat variasi nilai level pada masing-masing parameter untuk semua respon dimensi *error*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *raster angle* merupakan parameter penting yang berpengaruh pada kesalahan dimensi, sedangkan *layer height* lebih berpengaruh terhadap kekuatan tarik.

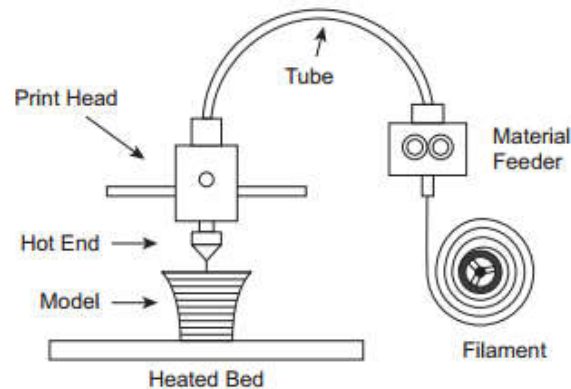
Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, parameter yang belum dilakukan penelitian yaitu *extrusion width* dan parameter yang masih perlu dilakukan penelitian yaitu *infill pattern*. Sehingga pada penelitian ini menggunakan kombinasi parameter tersebut dengan parameter lain yang berpengaruh terhadap produk dengan bahan PLA meliputi *fill pattern*, *extrusion width*, *nozzle temperature*, dan *fill density*. Dan pada penelitian ini hasil uji tarik dan pengukuran dimensi produk dianalisis menggunakan SNR dan ANOVA.

## **2.2. Dasar Teori**

### **2.2.1. Fused Deposition Modeling (FDM)**

*Fused Deposition Modelling* (FDM) adalah metode *Rapid Prototyping* yang proses fabrikasinya berbeda dengan metode lain yaitu tidak menggunakan sinar laser tetapi menggunakan *nozzle* yang dipanaskan. Material yang digunakan adalah termoplastik berbentuk filamen atau koil yang dipanaskan pada sebuah *heater*. Temperatur diatur dan dipertahankan oleh *heater* sehingga dapat membuat material menjadi *semi-solid* supaya mudah diekstrusi. Beberapa material yang dapat digunakan untuk bahan baku filamen adalah *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), *polycarbonate* (PC), *nylon*, *polylactic acid* (PLA), *Polyethylene* (PE), *Polypropylene* (PP), dan *Investment Casting Wax*.

Proses pembentukan objek tiga dimensi yang digunakan dalam proses fabrikasi FDM adalah lapis demi lapis (*layer by layer*). Material filamen ekstrusi akan mengeras secara cepat setelah dikeluarkan melewati *nozzle*. Ketebalan *layer* (*layer high*) berkisar antara 0.1-0.5 mm atau menyesuaikan dengan diameter *nozzle*. Untuk lebar *layer* (*extrusion width*) berkisar antara 0.2 mm – 0.7 mm bergantung pada besar diameter *nozzle* dan tebal *layer*.



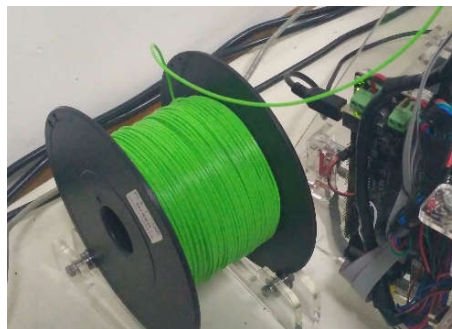
Gambar 2.1. Bagian-bagian pada mesin FDM (Thomas dkk, 2016)

Ketika mesin *Rapid Prototyping* ini mulai beroperasi, material filamen (*liquefier*) dilelehkan oleh *heating system*, selanjutnya material dikeluarkan melalui *nozzle* dengan pengaturan laju *feeder* oleh *drive wheel* dengan motor DC sebagai penggerakannya. Setelah mencapai *temperature* yang sesuai, *drive wheel* akan berputar (saklar *feeder* akan *on* pada saat program G-code berjalan) dan *nozzle* akan menekan keluar material untuk diendapkan. Gerakan *nozzle* diarahkan sesuai dengan perintah program G-code yang sebelumnya telah dibuat. Setelah *layer* pertama terbentuk, *nozzle* bergerak ke atas untuk membentuk *layer* selanjutnya (Sumantri, 2012).

### 2.2.2. Bagian – Bagian Mesin 3D Printing

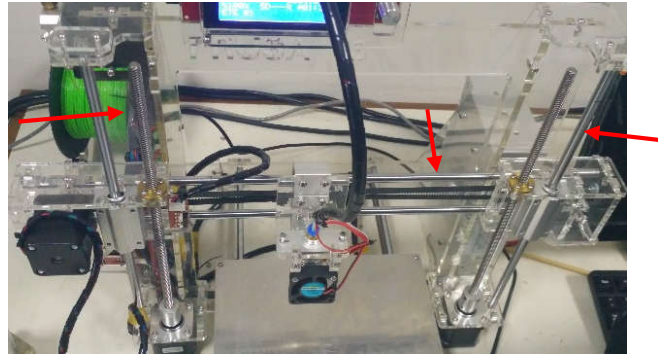
Menurut Hovart, (2014) ada beberapa komponen utama pada mesin 3D *printing* berbasis FDM. Berikut adalah bagian-bagian mesin 3D *printing*:

- A. Filamen adalah bahan yang dipanaskan sampai menjadi *semi-solid* selanjutnya diekstrusi untuk membuat suatu produk. Filamen ditunjukkan pada gambar 2.2.



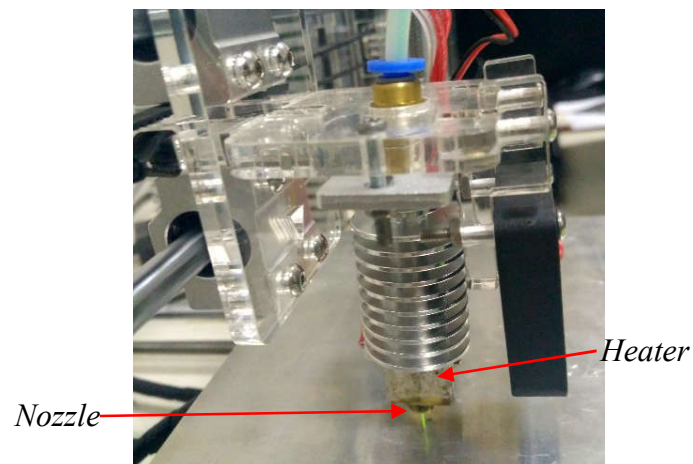
Gambar 2.2. Filamen

- B. *Frame* adalah struktur utama untuk menopang mesin 3D *printing*. *Frame* harus kaku dan kokoh sehingga cetaknya bisa terbentuk dengan akurat. *Frame* ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. *Frame* 3D printer

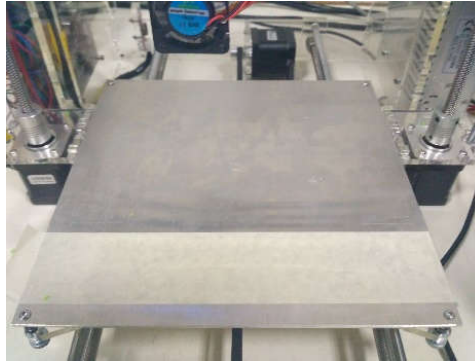
- C. *Print head* adalah bagian dari *printing* yang berguna untuk melelehkan dan menggerakkan filamen. *Print head* terdiri dari *nozzle*, *heater*, dan *fan*. *Print head* ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. *Print head*

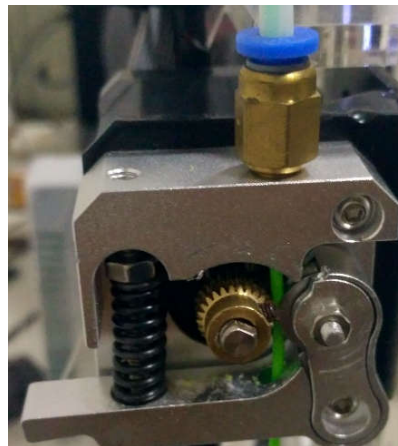
- D. *Nozzle* adalah bagian untuk mengeluarkan bahan yang berbentuk semi-solid setelah melewati *heater*. *Nozzle* menentukan kemampuan bahan dapat dicairkan dengan benar. *Nozzle* berkualitas baik dapat menyuplai bahan seperti polikarbonat, nilon, dan plastik suhu tinggi lainnya. *Nozzle* ditunjukkan pada gambar 2.4.
- E. *Build platform* atau *bed* adalah permukaan datar untuk mencetak. Beberapa *printing* memiliki *bed* yang dapat dipanaskan untuk memungkinkan

pencetakan bahan yang perlu dijaga temperaturnya selama proses cetak. *Bed* ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. *Bed* atau *build platform*

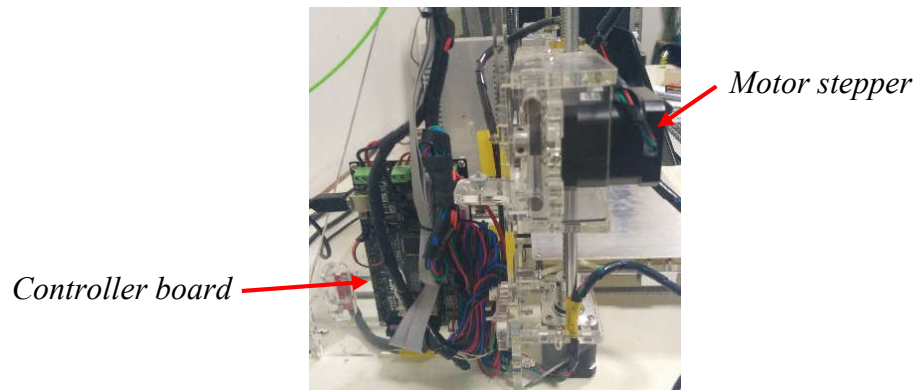
F. *Bowden* berfungsi untuk mengatur filamen saat didorong atau ditarik oleh motor. *Bowden* ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. *Bowden*

G. *Moving Parts* adalah kombinasi *motor stepper* yang terpasang pada sekrup, kabel, *belt*, dan sistem lain yang menempel pada *pulley*. Motor untuk printing 3D biasanya memiliki 200 *step per revolution*. Setidaknya ada 5 *motor stepper* pada 3D *printing*. *Motor stepper* ditunjukkan pada gambar 2.7.

H. *Electronics Control* terdiri dari mikroprosesor dan sebuah *board* sebagai kontrol untuk program pada mesin 3D *printing*. Sebagian besar *printing* 3D adalah sistem loop terbuka. *Electronics Control* ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. *Controller Board*

### 2.2.3. Parameter Pada Mesin 3D *Printing*

Parameter adalah suatu acuan yang digunakan untuk mengatur suatu nilai pada mesin untuk dapat memberikan hasil yang diinginkan pada saat proses. Pada mesin 3D *printing* parameter dimasukan melalui sebuah *software slicer* untuk menghasilkan bahasa program yaitu G-code, selanjutnya akan dibaca oleh mesin sebagai perintah untuk proses mencetak. Berikut parameter-parameter yang ada pada mesin 3D *printing*.

- A. *Nozzle temperature* adalah temperatur pada saat filamen diekstrusi.
- B. *Bed temperature* adalah temperatur pada papan/plat dimana objek menempel saat dicetak.
- C. *Layer height* adalah ketebalan setiap lapisan.
- D. *Extrusion width* adalah lebar pada material yang telah ekstrusi. Besar nilai *extrusion width* harus lebih besar dari *layer height*.
- E. *Perimeters* adalah jumlah minimum *shell* vertikal (dinding) yang akan dicetak.
- F. *Fill density* adalah tingkat kerapatan pada bagian inti dari objek yang akan dicetak. *Fill density* berkisar 0 sampai 100%.
- G. *Fill pattern* adalah pola pengisian pada bagian inti objek. Namun *fill pattern* hanya dapat dilakukan dengan *fill density* kurang 100%. Memilih *fill pattern* tergantung pada jenis model, kekuatan struktural yang diinginkan, dan kecepatan cetak. Pola *infill* pada umumnya berbentuk *rectilinear*, *line*, dan *honeycomb*.
- H. *Raster angle* adalah sudut pola *infill* (*infill pattern*).

- I. *Raft layers* berfungsi menambahkan lapisan tambahan di bawah model pada saat awal pencetakan yang berguna untuk menopang bagian *layer* yang mengambang. *Raft* memerlukan proses tambahan untuk menghilangkannya.
- J. Kecepatan adalah kecepatan gerak pada saat mencetak. Pada pengaturan *default* hanya ada tiga pengaturan kecepatan yang perlu dipertimbangkan:
  - a. *Perimeters speed* adalah kecepatan *outline* pada model. Proses cetak yang sedikit lebih lambat dapat membuat *outline* cetakan memiliki sisa material ekstrusi yang lebih sedikit.
  - b. *Infill speed* adalah kecepatan pada pola dari inti objek 3D. Kecepatan yang lebih tinggi menghasilkan ekstrusi yang lebih tipis, dan hal ini dapat mempengaruhi ikatan antar bagian yang ekstrusi.
  - c. *Travel speed* adalah gerak *nozzle* untuk berpindah pada saat tidak melakukan proses cetak.
- K. *Brim width* berfungsi untuk menambahkan *perimeter* lebih ke lapisan pertama sebagai dasar, yang berguna untuk memberi area permukaan lebih banyak agar dapat menempel pada *bed* dan mengurangi *warping* (sudut cetak terlepas dari *bed*).

#### 2.2.4. *Slicing* (Pembuatan Lintasan)

Membuat file CAD adalah bagian pertama dari proses pencetakan 3D. Langkah selanjutnya adalah membentuk lintasan cetak yang disebut *slicing*. Program *slicing* harus memperhitungkan karakteristik fisik *printer* dan geometri model yang sedang dicetak. Langkah ini adalah untuk membuat *file* G-code. Proses *slicing* yang terdapat pada 3D *printing* perlu menentukan sejumlah pengaturan seperti bahan, *temperature*, waktu untuk mengekstrusi bahan, dan pengaturan lain yang terdapat pada masing-masing program *licer* (Hovart, 2014: 47).

Pembuatan pola lintasan mesin *rapid prototyping* bertujuan agar pergerakan dapat dilakukan secara robotik pada bidang XYZ. Proses-proses ini membutuhkan pengaturan dalam pembuatan lintasan yang berbeda. Menurut Sumantri, (2012) pendekatan-pendekatan pengaturan untuk proses *slicing* dikategorikan ke dalam empat kelompok meliputi:



1. Metode *slicing* model CAD dengan ketebalan yang seragam (*uniform*)
2. Metode *slicing* model CAD dengan ketebalan *layer adaptive*
3. Metode *slicing* model CAD dengan ketebalan *adaptive*
4. Metode *slicing* dengan perhitungan kontur yang tepat

Model *slicing* ketebalan *layer* seragam dimana semua *layer* memiliki ketebalan yang sama sedangkan metode *slicing* ketebalan *layer adaptive*, ketebalan *layer* bervariasi menurut kompleksitas geometri. Proses pembuatan lintasan pada saat *slicing* dapat mempengaruhi kualitas permukaan, kekuatan, kekakuan, dan waktu pembuatan produk.

Penelitian ini menggunakan salah satu program *slicing open source* yaitu Slic3r. Program Slic3r adalah program *slicing* yang dapat diunduh secara gratis (di [slic3r.org](http://slic3r.org)) yang berguna untuk melakukan pengaturan pada proses *slicing*. Slic3r pada pengaturannya berdasarkan pada pengaturan dari pengguna sebagai perintah G-code yang akan dijalankan oleh *printing*. Slic3r dapat diakses baik sebagai program yang berdiri sendiri atau disematkan pada program lain (*host*) seperti pada Repetier-Host.

#### **2.2.5. Polylactic Acid (PLA)**

Menurut Drumright dkk, (2000) *Polylactic Acid* (PLA) adalah poliester alifatik yang mudah terurai dan didapat dari 100% sumber daya terbarukan atau bahan organik seperti jagung dan bit gula. PLA memiliki rumus kimia  $(\text{CH}_3\text{CHOHCOOH})_n$  yang masuk dalam jenis polimer atau plastik yang bersifat *biodegradable* dimana dapat terurai secara alami. Salah satu metode dalam produksi PLA adalah metode yang dipatenkan oleh Cargill (Amerika Serikat) pada tahun 1992 yaitu metode polimerisasi pembukaan cincin atau *ring opening polymerization* (ROP). Metode ROP dilakukan dengan melalui tiga tahapan meliputi polikondensasi pada asam laktat, selanjutnya dipolimerisasi untuk membentuk dimer siklik (*lactide*) dan metode ROP sehingga diperoleh PLA dengan massa molekul yang tinggi. Metode ROP akan menghasilkan PLA dengan massa molekul  $2 \times 10^4$  hingga  $6.8 \times 10^5$ .

Karakteristik fisik yang dimiliki PLA membuatnya dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. PLA memiliki lipatan retensi dan sifat kerutan yang baik, ketahanan minyak, temperatur rendah, dan dapat mempertahankan rasa dan aroma. Plastik konvensional memiliki kemungkinan yang besar untuk digantikan dengan plastik PLA. *Polylactic acid* bersifat termoplastik dengan nilai kekuatan tarik dan modulus polimer yang tinggi serta memiliki bobot molekul hingga mencapai 100.000 sampai 500.000, dan pada titik leleh di antara 145-155 °C. Karakteristik material PLA disajikan dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik umum dari *polylactid acid* produksi Nature Works Company (Jamshidian, 2010)

<i>Characteristics</i>	<i>Unit</i>	<i>Amount</i>
<i>Physical:</i>		
<i>Molecular weight</i>	g/mol	66000
<i>Specific gravity</i>	-	1.27
<i>Solid density</i>	g/cm <sup>3</sup>	1.2515
<i>Melt density</i>	g/cm <sup>3</sup>	1.0727
<i>Glasstransition temperature</i>	°C	55
<i>Melting temperature</i>	°C	165
<i>Specific heat (Cp)</i>		
190 °C	J/Kg °C	2060
100 °C	J/Kg °C	1955
55 °C	J/Kg °C	1590
<i>Thermal conductivity</i>		
190 °C	W/m °C	0.195
109 °C	W/m °C	0.197
<i>Mechanical:</i>		
<i>Tensile strength</i>	MPa	59
<i>Elongation at break</i>	%	7
<i>Elastic modulus</i>	MPa	3500
<i>Shear modulus</i>	MPa	1287
<i>Yield strength</i>	MPa	70
<i>Ultimate tensile strength</i>	MPa	73
<i>Percent of elongation</i>	%	11.3
<i>Young's modulus</i>	MPa	1280

### **2.2.6. 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 dan SPSS.

### **2.2.7. 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).

### 2.2.8. SNR

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 2.1 sebagai berikut:

$$SN_{STB} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \dots \dots \dots (2.1)$$

keterangan:

n : jumlah pengulangan dari suatu percobaan

yi : 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 2.2 sebagai berikut:

$$SN_{LTB} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \dots \dots \dots (2.2)$$

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 ( $\infty$ ) 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 2.3 sebagai berikut:

$$SN_{NTB} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

keterangan:

$\mu$  : *mean*

$\sigma$  : deviasi

#### 2.2.9. *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-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 2.4 sebagai berikut:

$$Sq_T = \sum_{i=1}^N y^2 \dots\dots\dots (2.4)$$

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 2.5 sebagai berikut:

$$Sq_A = \left[ \sum_{i=1}^{KA} \left( \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \dots\dots\dots (2.5)$$

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 2.6 sebagai berikut:

$$Sq_e = Sq_T - Sq_A \dots\dots\dots (2.6)$$

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 2.7 sebagai berikut:

$$Sq_m = n \times \hat{y}^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

keterangan:

n : jumlah percobaan

y : 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 2.8 sebagai berikut:

$$S_t = Sq_A + Sq_e \dots \dots \dots (2.8)$$

keterangan:

$Sq_m$  : jumlah kuadrat karena rata-rata

$Sq_A$  : jumlah kuadrat karena faktor ke A

#### 2.2.10. 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 dan atau interaksi faktor. Rumus perhitungan persen kontribusi adalah sebagai berikut perhitungan 2.10:

$$Sq'_A = SS_A - (Mqe \times DfA) \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\rho = \frac{Sq'_A}{S_t} \times 100\% \dots \dots \dots (2.10)$$

keterangan:

$Sq'_A$  : jumlah kuadrat murni untuk faktor A

$Sq_A$  : *sum of squares* faktor A

Mqe : mean squares error

DfA : derajat kebebasan faktor A

$S_t$  : *sum of squares* total faktor

$\rho$  : 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).

### 2.2.11. Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk menguji hasil kombinasi faktor optimum yang telah didapat pada analisis SNR. Pada eksperimen konfirmasi langkah-langkah pengujiannya adalah:

1. Merancang kondisi yang optimum untuk parameter proses dan level signifikan.
2. Melakukan *pooling-up* faktor yang tidak signifikan.
3. Menentukan tingkat kepercayaan ( $\alpha$ ) yang akan digunakan.
4. Menghitung rata-rata prediksi ( $\mu$ ) berdasarkan data hasil kombinasi parameter optimum yang diperoleh.
5. Menghitung Interval kepercayaan.

Setelah dilakukan langkah-langkah seperti di atas, selanjutnya dilakukan analisis. Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil jika nilai hasil mendekati nilai prediksi dan berada pada kisaran nilai interval kepercayaan.

### 2.2.12. Uji Tarik

Pengujian tarik banyak dilakukan bertujuan yaitu melengkapi suatu informasi kekuatan dasar bahan dan digunakan untuk data pendukung bagi spesifikasi bahan. Pada pengujian tarik benda di uji dengan diberi beban gaya tarik sumbu yang secara terus bertambah, di waktu yang sama dilakukan pengamatan perpanjangan benda yang sedang di uji. Dalam pengujian menggunakan standar ASTM D638 tipe 1, untuk tegangan tarik dapat dihitung dengan rumus 2.11 sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{f}{A} \dots \dots \dots (2.11)$$

keterangan:

- $\sigma$  : Tegangan Tarik (MPa)
- $f$  : Beban Tarik Maksimum (N)
- $A$  : Luas Penampang (mm<sup>2</sup>)

Sesuai dengan standar ASTM D638 tipe 1, bahwa perlu diperhatikannya kecepatan saat pengujian tarik karena terpengaruhnya terhadap waktu dan besaran



regangan yang terjadi. Adapun kecepatan uji tarik ini adalah 5 mm/min karena tingkat ketelitiannya akurat dan sesuai dengan standar ASTM D638 tipe I. Kecepatan yang berbeda berpengaruh pada saat pengujian terutama pada regangan yang ditunjukkan. Tabel 2.2 menunjukkan kecepatan pengujian tarik untuk setiap tipe dan klasifikasi standar ASTM D638.

Tabel 2.2. Kecepatan pengujian tarik ASTM (ASTM Internasional, 2002)

<i>Classification</i>	<i>Specimen Type</i>	<i>Speed of Testing, mm/min (in./min)</i>	<i>Nominal Strain Rate at Start of Test, mm/mm-min (in./in.-min)</i>
<i>Rigid and Semi rigid</i>	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ±10%	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ±10%	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25%	1
		100 (5) ± 25 %	10
		500 (20) ± 10 %	10