

BAB II

TINJAUAN PUSTAKAN DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

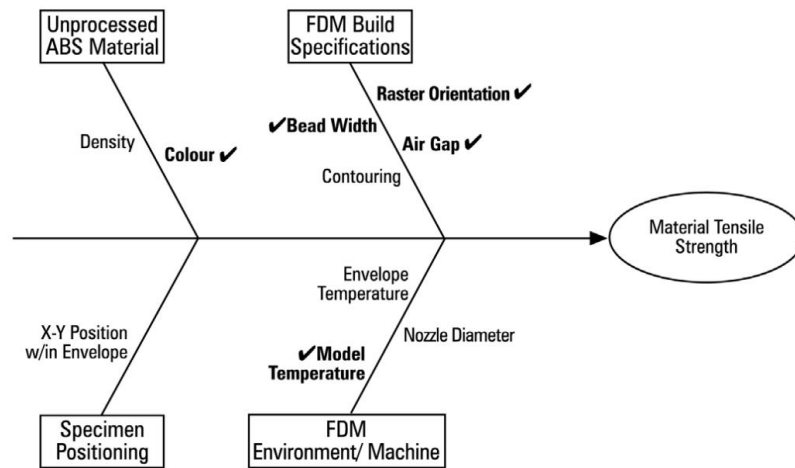
Tyas (2015) memaparkan bahwa pemanfaatan teknologi 3D *printing* di Indonesia masih rendah. Meskipun saat ini teknologi 3D *printing* sudah tersedia dalam ukuran *portable* namun pemanfaatannya masih rendah dalam industri manufaktur dan riset. Hal ini berkaitan dengan masih sedikitnya referensi yang bersumber dari peneliti Indonesia.

Penelitian tentang akibat dari *infill parameter* yang tepat pada teknologi FDM dilakukan oleh Abbas, dkk (2017). Dari penelitian tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar parameter *infill density* yang digunakan, maka akan memperbesar kekuatan tekan pada 90° dan waktu *printing* akan semakin lama. Pada penelitian ini parameter *infill density* yang terbaik adalah 80% dengan kekuatan tekan sebesar 30 Mpa dengan mengikuti spesifikasi ASTM D695.

Lee, dkk (2005) telah melakukan percobaan untuk mengetahui parameter proses yang optimal menggunakan mesin FDM dengan berbasis RP agar bisa memaksimalkan fleksibilitas dari *prototype*. Pada percobaan ini, mereka menggunakan metode Taguchi untuk membuat *design of experiments* (DOE). Mereka juga menggunakan *signal to noise* (S/N) *ratio* dan *analysis of varians* (ANOVA) untuk mengetahui dan menganalisis parameter proses yang sesuai agar mendapatkan nilai elastis yang optimal untuk ABS *prototype*. Dari hasil penelitian diketahui bahwa parameter proses *layer thickness*, *raster angle*, dan *air gap* secara signifikan dapat mempengaruhi nilai elastisitas ABS *prototype*.

Perbuatan *prototype* yang dibuat dengan cara fabrikasi dapat terdiri dari berbagai macam model dan material. Stratasys FDM merupakan salah satu tipe RP yang dapat membuat *prototype* dengan bahan plastik ABS. Dalam penelitian yang dilakukan Ahn, dkk (2002), *dog bone* yang mereka buat sesuai standar ASTM D638 dengan fabrikasi FDM 1650 dengan pengaturan parameter tertentu untuk mendapatkan sifat material. Parameter yang digunakan adalah *raster*

orientation, air gap, bead width, color, dan model temperature seperti yang terlihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1. *Fish bone diagram* yang berpengaruh pada *tensile strength*.

(Sumber : Ahn 2002)

Penelitian ini menggunakan *DOE Approach* dengan membandingkan hasil *tensile strengths* dan *compressive strengths* dari ASTM D638 dengan *injection molding* FDM ABS P400 material. Hasil yang didapatkan adalah *tensile strength* dengan *ranged* diantara 65 sampai 72 persen dari *injection molding* ABS P400 dan *compressive strength* diantara 80 sampai 90 persen dari *injection molding* ABS P400. Beberapa nilai atau parameter yang digunakan merupakan hasil dari percobaan (trial).

Nair melakukan percobaan menggunakan metode taguchi pada tahun 1992. Taguchi menggunakan ANOVA untuk memperkirakan (*estimated*) SNR untuk mengidentifikasi setting dari parameter control yang akan menghasilkan performansi yang kokoh (*robust*). Parameter yang tidak berpengaruh pada SNR kemudian digunakan untuk memperbaiki rata – rata performansi target. Parameter tersebut dinamakan *adjustment factors*. Parameter ini biasanya dapat diidentifikasi melalui analisis data.

Sukindar, dkk (2017) melakukan penelitian pada proses *impact* dengan menganalisis hasil kekuatan tarik menggunakan mesin 3D *printer* dan software Repetier-Host. *Replicating Rapid Prototyper* (RepRap) adalah suatu *open source* yang telah berevolusi dari mesin 3D *printer* yang berbasis RP. Pada penelitian ini

menggunakan tiga parameter yaitu *layer thickness*, *shell thickness*, dan *printing speed*. Penelitian ini menggunakan analisis SNR dan ANOVA. Hasil yang didapatkan dari analisis ANOVA adalah parameter *shell thickness* berpengaruh terhadap hasil kekuatan tarik.

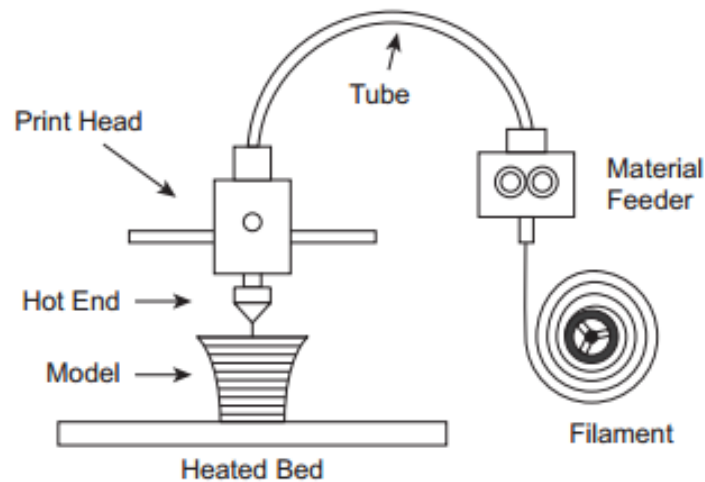
Berdasarkan tinjauan pustaka diatas, nilai *tensile strength* dalam uji tarik dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya *nozzle temperature*, *extrusion width* dan *infill density*. Kombinasi nilai parameter masih perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan parameter yang optimal terhadap respon akurasi dimensi dan kekuatan tarik. Pada penelitian hasil pengujian tarik akan dilakukan analisis dengan metode *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Analysis of Varians* (ANOVA).

2.2 Dasar Teori

2.2.1. *Fused Deposition Modeling* (FDM)

Fused Deposition Modelling (FDM) adalah metode *Rapid Prototyping* yang sedikit berbeda dengan metode lain yang menggunakan sinar laser dalam proses fabrikasi (Sumantri, 2012). Material yang digunakan adalah material termoplastik yang berbentuk filamen seperti kawat yang dipanaskan pada sebuah *heater*. Temperatur diatur dan dipertahankan oleh *heater* sehingga dapat membuat material menjadi *semi-solid* supaya mudah diekstrusi. Beberapa material yang biasanya digunakan untuk bahan baku pembuatan filamen adalah ABS, PC), *nylon*, PLA, PE, PP, dan *Investment Casting Wax*.

Proses pembentukan objek tiga dimensi yang digunakan dalam proses fabrikasi FDM adalah dengan cara 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 2.2. Bagian-bagian pada mesin FDM (Thomas dkk, 2016)

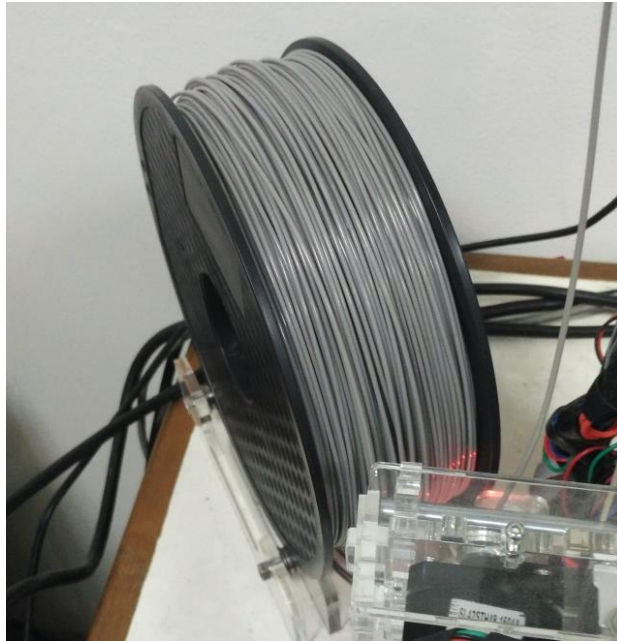
Ketika mesin *Rapid Prototyping* ini akan beroperasi, pemanasan material filamen (*liquefier*) dilakukan oleh *heating system*, selanjutnya material keluar dari *nozzle* dengan pengaturan laju *feeder* oleh *drive wheel* yang digerakkan oleh motor DC. Setelah mencapai *temperature* yang sesuai, *drive wheel* akan berputar (saklar *feeder* akan *on* pada saat program *G-code* berjalan) untuk menyuplai dan menekan keluar material melalui *nozzle*. Gerakan *nozzle* akan diarahkan sesuai dengan program *G-code*. Setelah *layer* pertama terbentuk, *nozzle* bergerak ke atas untuk membentuk *layer* selanjutnya (Sumantri, 2012).

2.2.2. Bagian – Bagian Mesin 3D Printer

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

1. *Filament*

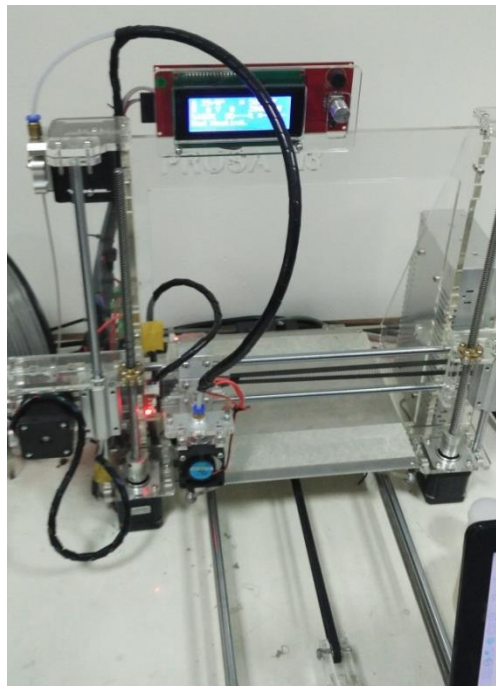
Filament adalah bahan yang dipanaskan sampai menjadi *semi-solid* selanjutnya diekstrusi untuk membuat suatu produk. Filamen ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. *Filament*

2. *Frame*

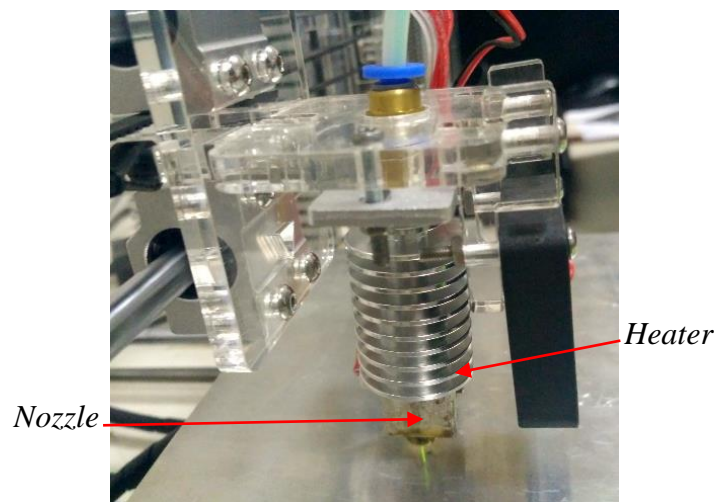
Frame adalah struktur utama untuk menopang mesin 3D *printing*. *Frame* harus kaku dan kokoh sehingga cetaknya bisa terbentuk dengan akurat. *Frame* ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. *Frame 3D printer*

3. *Print head*

Print head adalah bagian dari *printer* yang berguna untuk melelehkan dan menggerakkan filamen. *Print head* terdiri dari *nozzle*, *heater*, dan *fan*. *Print head* ditunjukkan pada gambar 2.5.



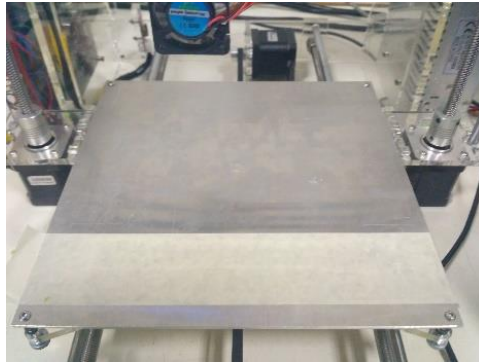
Gambar 2.5. *Print head*

4. *Nozzle*

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 2.5.

5. *Build platform* atau *Bed*

Build platform atau *bed* adalah permukaan datar untuk mencetak. Beberapa *printer* memiliki *bed* yang dapat dipanaskan untuk memungkinkan pencetakan bahan yang perlu dijaga temperaturnya selama proses cetak. *Bed* ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. *Bed* atau *build platform*

6. *Bowden*

Bowden berfungsi untuk mengatur filamen saat didorong atau ditarik oleh motor. *Bowden* ditunjukkan pada gambar 2.7.



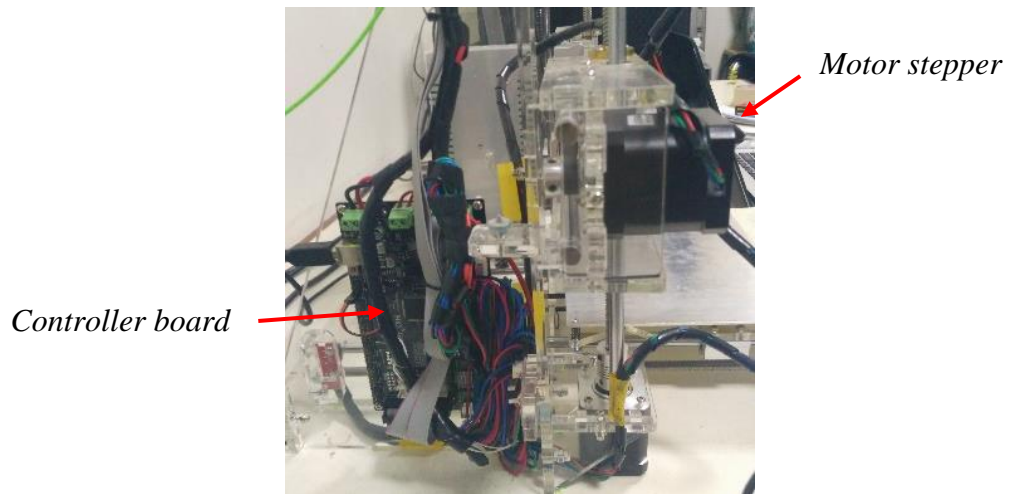
Gambar 2.7. *Bowden*

7. *Moving part*

Moving Parts adalah kombinasi *motor stepper* yang terpasang pada sekrup, kabel, *belt*, dan sistem lain yang menempel pada *pulley*. Motor untuk printer 3D biasanya memiliki 200 *step per revolution*. Setidaknya ada 5 *motor stepper* pada 3D printer. *Motor stepper* ditunjukkan pada gambar 2.8.

8. *Electronics control*

Electronics Control terdiri dari mikroprosesor dan sebuah *board* sebagai kontrol untuk program pada mesin 3D printing. Sebagian besar printer 3D adalah sistem loop terbuka. *Electronics Control* ditunjukkan pada gambar 2.8.

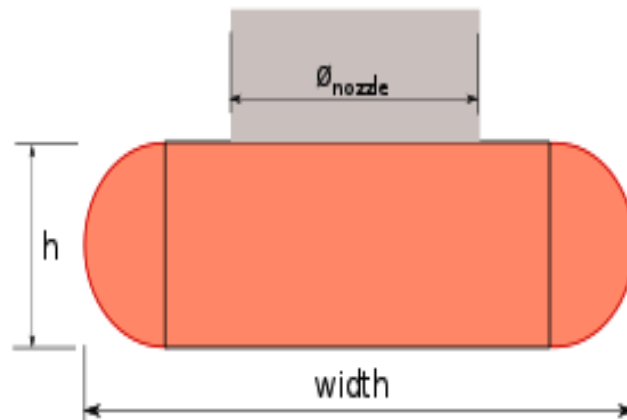


Gambar 2.8. *Controller Board*

2.2.3. Parameter Pada Mesin 3D Printer

Parameter adalah suatu acuan yang digunakan untuk mengatur suatu nilai pada mesin untuk dapat memberikan hasil yang diinginkan pada saat proses. Pada mesin 3D *printer* 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*.

1. *Temperature nozzle* adalah temperatur pada saat filamen diekstrusi.
2. *Temperature bed* adalah temperatur pada papan/plat dimana objek menempel saat dicetak.
3. *Layer height* adalah ketebalan setiap lapisan.
4. *Extrusion width* adalah lebar pada material yang telah ekstrusi. Besar nilai *extrusion width* harus lebih besar dari *layer height*. Untuk mengetahui volume ekstrusi minimal pada kombinasi *layer height* dan diameter *nozzle* digunakan perhitungan sebagai berikut:



$$E = h \times \pi \times \left(\frac{d}{4}\right)^2 \dots\dots\dots (3.1)$$

E = Volume Ekstrusi (mm^3)

h = *Layer Height* (mm)

d = *Diameter Nozzle* (mm)

diketahui:

h : 0.2 mm

d : 0.4 mm

$$E = 0.2 \text{ mm} \times \pi \times \left(\frac{0.4 \text{ mm}}{4}\right)^2 = 0.0063 \text{ mm}^3$$

Dengan perhitungan di atas selanjutnya dilakukan perhitungan prediksi volume ekstrusi dari *extrusion width* adalah sebagai berikut:

$$E = \left(h(w - h) + \pi \left(\frac{h}{2}\right)^2\right) \times w \dots\dots\dots (3.2)$$

E : Volume Ekstrusi (mm^3)

h : *Layer height* (mm)

w : *Extrusion width* (mm)

diketahui:

h : 0.20 mm

w₁ : 0.30 mm

w₂ : 0.35 mm

w₃ : 0.40 mm

$$E_1 = \left(0.2 \text{ mm} (0.3 - 0.2 \text{ mm}) + \pi \left(\frac{0.2 \text{ mm}}{2} \right)^2 \right) \times 0.3 \text{ mm}$$

$$= 0.015 \text{ mm}^3$$

$$E_2 = \left(0.2 \text{ mm} (0.35 - 0.2 \text{ mm}) + \pi \left(\frac{0.2 \text{ mm}}{2} \right)^2 \right) \times 0.35 \text{ mm}$$

$$= 0.021 \text{ mm}^3$$

$$E_3 = \left(0.2 \text{ mm} (0.4 - 0.2 \text{ mm}) + \pi \left(\frac{0.2 \text{ mm}}{2} \right)^2 \right) \times 0.4 \text{ mm}$$

$$= 0.028 \text{ mm}^3$$

Dari hasil perhitungan di atas bahwa *extrusion width* 0.3 mm, 0.35 mm, dan 0.4 mm dapat digunakan sebagai parameter proses penelitian.

5. *Perimeters* adalah jumlah minimum *shell* vertikal (dinding) yang akan dicetak.
6. *Fill density* adalah tingkat kerapatan pada bagian inti dari objek yang akan dicetak. *Fill density* berkisar 0 sampai 100%.
7. *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*.
8. *Raster angle* adalah sudut pola *infill* (*infill pattern*).
9. *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.
10. 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.
11. *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 *printer* perlu menentukan sejumlah pengaturan seperti bahan, *temperature*, waktu untuk mengekstrusi bahan, dan pengaturan lain yang terdapat pada masing-masing program *slicer* (Hovart, 2014: 47).

Pola lintasan mesin *rapid prototyping* dibuat agar dapat digerakkan secara robotik pada bidang XYZ. Proses-proses ini membutuhkan pengaturan dalam pembuatan lintasan yang berbeda. Menurut Sumentri, (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.

Dalam penelitian ini menggunakan salah satu program *slicing open source* yaitu Slic3r. Program Slic3r adalah program *slicing* yang dapat diunduh secara gratis (di 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 *printer*. Slic3r dapat diakses baik sebagai program yang berdiri sendiri atau disematkan pada program lain (*host*) seperti pada Repetier-Host.

2.2.5. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Acrylonitril butadiene styrene (ABS) adalah salah satu polimer organik pembentuk plastik yang terdiri dari tiga monomer pembentuk yaitu *acrylonitril*, *butadiene*, dan *styrene*. Ketiga monomer tersebut memberikan sifat tahan terhadap bahan kimia, stabil terhadap panas, sifat ketahanan pukul, sifat kuat (*toughness*), sifat kaku (*rigidity*), dan mudah diproses (Mujiarto, 2005). ABS adalah polimer yang berbasis minyak bumi, memiliki rumus kimia $(C_8H_8)_x (C_4H_6)_y (C_3H_3N)_z$.

Budyantoro, (2016) beberapa *grade* pada ABS juga memiliki karakteristik yang bervariasi dari *impact resistance* rendah sampai yang tinggi dan dari kilap rendah sampai tinggi, dan beberapa sifat lanjutan jika material ABS ini diberikan penambahan zat aditif seperti tahan bahan kimia, tahan korosi, tahan sinar UV, menghambat nyala api, transparan, dan tahan panas tinggi. Material ABS *resin typical toyolac 700 314* digunakan dalam produk otomotif, produk media, produk hiburan dan aplikasi lainnya (Gb.2.9).



Gambar 2.9 Produk- produk plastik ABS

(Sumber : Toray industri, 2017)

Adapun sifat khusus yang dimiliki material ABS adalah warna yang konsisten dan stabil, tahan terhadap pelapukan, dapat mempertahankan transparansi terhadap kelembapan dan suhu tinggi, keseimbangan aliran yang baik, berkurangnya berat saat pemanasan, *impact strength* yang baik, dan baik pada kondisi cahaya tinggi.

Material ABS memiliki sifat *higroskopis* dan menyerap kelembapan dalam proporsi kelembapan lingkungan. Temperatur leleh filamen ABS ini antara 220°C - 260°C, temperatur leleh ini harus sering diperiksa dan dikontrol agar tidak melebihi suhu yang telah direkomendasikan. Untuk menghindari *bending* dan *warping* penggunaan bahan ABS pada *bed* dapat diatur pada suhu 80°C – 115°C agar hasil pencetakan dapat mengkilap dan halus.

Kelebihan material ABS adalah harga yang terjangkau, tersedia dalam berbagai macam warna, dapat digunakan pada beberapa mesin *3D printing*, memiliki daya tahan yang kuat, tahan suhu tinggi, umur pakai yang lebih lama. Sedangkan kekurangan bahan ABS adalah material yang mengandung racun sehingga bisa mengganggu kesehatan, membutuhkan tempat pembuatan yang bersuhu panas tinggi, bahan ABS tidak cocok digunakan untuk makanan dan minuman

2.2.6. Design of Experiment (DOE)

Design of experiment adalah suatu rancangan percobaan dengan tiap langkah tindakan yang benar-benar didefinisikan sehingga informasi yang berhubungan dengan persoalan yang sedang diteliti dapat dikumpulkan. Desain eksperimen adalah langkah-langkah yang perlu diambil sebelum eksperimen dilakukan agar data yang semestinya dapat diperoleh. Tujuan dari desain percobaan adalah untuk memperoleh atau mengumpulkan informasi sebanyak-banyaknya yang diperlukan dan berguna dalam melakukan penelitian suatu persoalan. Desain percobaan terdiri dari beberapa jenis antara lain:

1. Desain pra eksperimental

Desain pra eksperimental adalah desain percobaan yang tidak mencukupi syarat-syarat dari suatu desain percobaan yang sebenarnya.

2. Desain eksperimental semu

Desain eksperimental semu adalah desain percobaan yang belum sepenuhnya mempunyai sifat-sifat suatu percobaan sebenarnya. Desain percobaan ini mempunyai banyak kekurangan baik dalam masalah *random*, replikasi ataupun masalah control internal. Karena kekurangan-kekurangan ini penelitian harus mempunyai cukup syarat untuk disebut percobaan yang sebenarnya.

3. Desain percobaan

Desain percobaan sebenarnya adalah desain dimana aturan untuk menempatkan perlakuan pada *unit* percobaan dibuat sedemikian rupa. Sehingga memungkinkan membuat perbandingan antar kelompok dengan validitas tinggi dan dapat mengontrol sumber-sumber variasi pada percobaan tersebut. Rancangan percobaan dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi. Metode ini digunakan untuk mengetahui kondisi pengaturan parameter proses yang optimal dengan bantuan *software Minitab*.

2.2.7. Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah suatu metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dan dalam waktu yang bersamaan menekan biaya dan 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, 2009:273). 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 dan jumlah. 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. 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 memilih nilai level faktor, untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Oleh karena itu metode perhitungan rasio S/N 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 the best* (STB)

Smaller is the best 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 :

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

Keterangan :

n : jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y_i : data pengamatan ke i

2. *Larger is the best* (LTB)

Larger is the best 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 :

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

Keterangan :

n : jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y_i : data pengamatan ke i

3. *Nominal is the best* (NTB)

Nominal is 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 :

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

Keterangan :

μ : *mean*

σ : nilai 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 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:

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

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:

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

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:

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

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:

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

keterangan:

n : jumlah percobaan

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:

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

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:

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

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

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

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).

2.2.11. Eksperimen Kontribusi

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 (α) yang akan digunakan.
4. Menghitung rata-rata prediksi (μ) berdasarkan data hasil kombinasi parameter optimum yang diperoleh.
5. Menghitung Interval kepercayaan.

Setelah dilakukan langkah-langkah seperti diatas, 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:

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

keterangan:

- σ : Tegangan Tarik (MPa)
- F : Beban Tarik Maksimum (N)
- A : Luas Penampang (mm²)

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 2.1 menunjukkan kecepatan pengujian tarik untuk setiap tipe dan klasifikasi standar ASTM D638.

Tabel 2.1. 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>I, II, III rods and tubes</i>	5 (0.2) \pm 25 %	0.1
		50 (2) \pm 10%	1
		500 (20) \pm 10 %	10
	<i>IV</i>	5 (0.2) \pm 25 %	0.15
		50 (2) \pm 10%	1.5
		500 (20) \pm 10 %	15
	<i>V</i>	1 (0.05) \pm 25 %	0.1
		10 (0.5) \pm 25%	1
		100 (5) \pm 25 %	10
		500 (20) \pm 10 %	10