

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Agris Setiawan, (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter proses ekstrusi 3D *printer* terhadap sifat mekanisme cetak komponen berbahan filamen PLA . Parameter proses mesin 3D *Printer* pada setting A yaitu *Print speed* 80 mm/s, *layer height* 0,15 mm dan temperatur *extruder* 220°C menghasilkan angka uji tarik spesimen tertinggi. Nilai rerata yang tertinggi didapat pada rerata spesimen B dengan nilai sebesar 27,96 MPa. Spesimen C mempunyai nilai rerata kekuatan tarik (σ) sebesar 27,81 MPa. Spesimen A nilai rerata kekuatan tariknya dengan nilai sebesar 27,81 MPa sehingga dapat diketahui kecepatan *print speed* mempengaruhi kekuatan tarik spesimen. Nilai rerata *yield strength* dari pengujian tarik. Hasil perbandingan dari nilai rerata yang didapat dari variasi spesimen maka nilai rerata *yield strength* (σ_{ys}) yang tertinggi didapat pada spesimen A dengan nilai sebesar 25,38 MPa, spesimen B mempunyai nilai rerata *yield strength* (σ_{ys}) sebesar 25,37 MPa. Spesimen C nilai rerata *yield strength* (σ_{ys}) sebesar 21,46 MPa. Nilai rerata persentase *shrinkage* (%), spesimen yang mengalami penyusutan paling besar adalah spesimen B, sedangkan spesimen A sebesar 0,6% kemudian spesimen C sebesar 0,3%.

Sobron L. dkk, (2016) penelitian yang dilakukan yakni tentang pengaruh orientasi objek pada proses 3D *printing* bahan *polymer* PLA dan ABS terhadap kekuatan tarik dan ketelitian dimensi produk maka dapat dibuat beberapa kesimpulan. Pertama posisi orientasi objek dan tebal layer pada proses *printing* menentukan kualitas permukaan, efisiensi waktu proses dan kekuatan dari produk yang dihasilkan. Nilai kesalahan akurasi dimensi spesimen produk *printing* berbanding lurus terhadap besar layer yang digunakan. Kemudian, nilai kesalahan akurasi dimensi terkecil

dengan nilai 0.42 mm terjadi pada orientasi objek horizontal dan tebal layer 0.1 mm pada printing material ABS. Sedangkan jumlah kesalahan akurasi terbesar dengan nilai 1.3 mm terjadi posisi orientasi objek vertikal dan tebal layer sebesar 0.4 mm pada printing material ABS. Produk material PLA dengan orientasi posisi objek horizontal memiliki kualitas dimensi yang paling baik. Jumlah kesalahan akurasi material ini tidak melebihi 1 mm pada setiap layer. Selain itu, material ABS dengan posisi orientasi objek vertikal dan tebal layer sebesar 0,10 mm menghasilkan kekuatan tegangan tarik yang terkecil sebesar 8,62 MPa dan material PLA dengan orientasi posisi objek horizontal dengan dan tebal layer sebesar 0,40 mm menghasilkan kekuatan tegangan tarik terbesar 35,57 MPa.

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.

Mahardika, (2017) hasil penelitian yakni parameter proses paling berpengaruh terhadap respon akurasi dimensi produk 3D *printing* PLA berbeda-beda pada ke empat dimensi, tetapi didominasi oleh *nozzle temperature* dengan rata-rata kontribusi sebesar 40 %. Parameter proses paling berpengaruh terhadap respon kekuatan tarik untuk produk 3D *printing* PLA adalah *infill density* dengan kontribusi sebesar

40.78% dan diikuti oleh *nozzle temperature* dengan nilai kontribusi sebesar 14.17%. Kombinasi level parameter proses paling optimum pada respon akurasi dimensi memiliki hasil yang berbeda-beda untuk ke empat dimensi. Sedangkan untuk respon kekuatan tarik adalah 215 °C pada *nozzle temperature*, 0.35 mm pada *extrusion width*, 75% pada *infill density*, dan *honeycomb* pada *infill pattern*. Kombinasi level parameter optimum untuk respon kekuatan tarik yang dihasilkan menggunakan metode taguchi pada eksperimen konfirmasi terbukti dapat memperbaiki kekuatan pada produk 3D *printing* dimana memiliki nilai tegangan tarik sebesar 30.52 MPa yang memenuhi *confidence interval* (CI) 95% dengan variasi antar replikasi yang lebih kecil.

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 °C, 200 °C 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 yaitu pada *Feedrate* dan parameter yang masih perlu dilakukan dalam penelitian lebih lanjut atas kombinasi parameter tambahan yakni pada parameter *Extrusion width* dan *Nozzle temperature*, sehingga pada penelitian ini akan diketahui bagaimana pengaruh

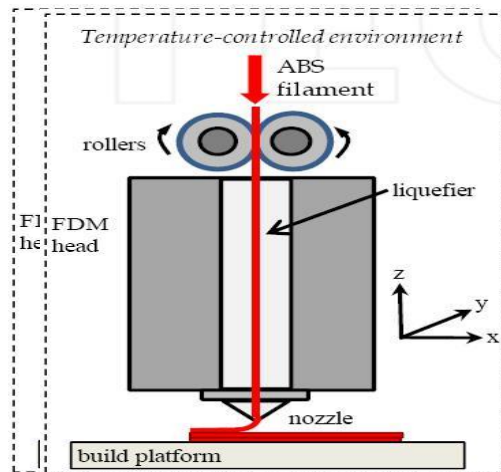
kombinasi dari parameter - parameter tersebut terhadap bahan filamen ABS, dan pada penelitian ini hasil pegujian lentur dan pengukuran dimensi produk akan dianalisis menggunakan SNR dan ANOVA.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Rapid Prototyping jenis Fused Deposition Modelling (FDM)

Rapid prototyping merupakan teknik yang dapat digunakan untuk mengubah data *computer aided design* (CAD) menjadi benda 3D, dengan *additive manufacture* atau teknologi *3D printing*. Berkembangnya teknologi *rapid prototyping* yang menggunakan teknologi *3D printing* membuat proses desain atau pengembangan produk menjadi lebih cepat. Dalam pengembangan produk atau desain produk tidak akan terlepas oleh kebutuhan untuk membuat suatu contoh hasil produk atau *prototype* sebelum memproduksi produk secara masal. Tujuan dari hal ini adalah untuk memaksimalkan efisiensi dan evaluasi produk. Dengan desain produk yang baik maka biaya manufaktur dan *assembly* dari produk dapat di minimalisir. Teknologi *3D printing* saat ini sudah semakin banyak digunakan oleh industri karena memiliki banyak kelebihan, antara lain pilihan jenis material yang sangat banyak, proses pembuatan yang cepat, biaya perawatan rendah, serta mampu membuat benda dengan bentuk geometris yang kompleks. Teknologi *rapid prototyping* yang paling umum sekarang adalah dengan menggunakan *additive (additive manufacturing)*. Beberapa teknologi *rapid prototyping* yang berkembang saat ini adalah *Stereolithography* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS), dan *Fused Deposition Modeling* (FDM). Sejak awal teknologi print pada tahun 1984 yang dinamakan *solid freeform fabrication* yang pada jaman sekarang disebut juga sebagai *3D printing* atau *additive manufacturing*. Terdapat banyak jenis teknologi *rapid prototyping* yang paling umum digunakan adalah dengan menggunakan *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Budiman dkk, 2016).

Fused Deposition Modelling (FDM) adalah Manufacturing adiktif atau 3D *printing* yang telah menjadi populer untuk menciptakan prototype dengan cepat sejak 1980-an yang diciptakan oleh scott crump, metodenya menggunakan filamen termoplastik yang dipanaskan sampai titik leleh dan kemudian *diekstrusi* oleh *nozzle* secara lapis demi lapis untuk membuat objek tiga dimensi 3D (Lie. Yuan., 2008) Cara kerja *Fused Deposition Modeling* (FDM) yakni objek yang dibuat dengan printer FDM mulai keluar sebagai desain (CAD) file dibantu computer, sebelum sebuah objek dapat dicetak file harus diubah keformat 3D *printing* yang bisa dipahami yaitu STL. Selama percetakan bahan-bahan ini berbentuk benang plastik atau filamen yang diekstrusikan oleh *nozzle*. Bagian – bagian pada mesin FDM dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1.

Komponen pada mesin FDM (Winarto S. 2015)

Saat mesin *Fused Deposition Modelling* ini mulai bekerja, material filamen akan dilelehkan oleh *heating system*, material yang digunakan adalah termoplastik berbentuk filamen 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 polimer jenis termoplastik yang dapat didaur ulang seperti

acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polycarbonate (PC), nylon, polylactic acid (PLA), Polyethylene (PE), dan Polypropylene (PP).

2.2.2. 3D Printing

3D printing atau sering juga disebut sebagai *additive manufacturing* adalah suatu proses pembuatan suatu obyek *solid* 3 dimensi dari suatu model digital. Proses pencetakan 3D dikerjakan dengan proses aditif, dimana obyek dibuat dengan cara meletakkan/ menambahkan material lapis demi lapis. Metode pencetakan 3D sangat berbeda dengan teknik pemesinan tradisional yang lebih dikenal dengan proses subtraktif dimana pembuatan produk dengan cara mengurangi material awal melalui proses penyayatan. *3D printing* pertama kali dipublikasikan oleh Hideo Kodama dari Nagoya Municipal Industrial Research Institute pada 1982. Pertama kali *3D printer* dapat bekerja atas hasil karya Charles W. Hull dari 3D Systems Corp. pada tahun 1984 (Triwibowo dkk, 2015).

Aplikasi teknologi *3D printing* ini banyak digunakan terutama untuk membuat purwa rupa (*prototype*) pada industri telepon genggam, *jewellery*, penerbangan, otomotif, sepatu, desain industri, arsitektur, konstruksi, dental, industri medis, pendidikan, teknik sipil dan lainnya. Dengan memanfaatkan teknologi ini perancang akan dengan cepat mewujudkan kreasinya menjadi obyek 3D, sehingga segera dapat dianalisa kelayakan suatu produk seperti ergonomi dan lainnya. Ada beberapa komponen utama pada mesin *3D printing* berbasis FDM menurut Hovart (2014). Berikut adalah bagian-bagian mesin *3D printing* :

- a. *Frame* adalah struktur utama untuk menopang mesin *3D printing*. *Frame* harus kaku dan kokoh sehingga cetaknya bisa terbentuk dengan akurat.
- b. *Print head* adalah bagian dari *printing* yang berguna untuk melelehkan dan menggerakkan filamen. *Print head* terdiri dari *nozzle*, *heater*, dan *fan*.

- c. *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.
- d. *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.
- e. *Bowden* berfungsi untuk mengatur filamen saat didorong atau ditarik oleh motor.
- f. *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*.
- g. *Electronics Control* terdiri dari mikroprosesor dan sebuah *board* sebagai kontrol untuk program pada mesin 3D *printing*. Sebagian besar *printing* 3D adalah sistem loop terbuka.

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: *Perimeters speed* adalah kecepatan *outline* pada model. Proses cetak yang sedikit lebih lambat dapat membuat *outline* cetakan memiliki sisa material ekstrusi yang lebih sedikit.

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. *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 (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. Acrilonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Teknologi 3D Printing FDM (Fused Deposition Modelling) merupakan teknologi 3D Printing yang menggunakan material plastik (polimer). Banyak jenis plastik yang digunakan. 3D Printing juga tidak lepas dari banyak pilihan plastik yang mengikuti fungsi dan tujuan dari hasil 3D print tersebut. Berdasarkan bahan baku polimer yang tersedia sebagai filament 3D printing yang digunakan adalah polimer jenis termoplastik. Polimer termoplastik adalah polimer yang mempunyai sifat tidak tahan terhadap panas. Jika polimer jenis ini dipanaskan, maka akan menjadi lunak dan didinginkan akan mengeras. Proses tersebut dapat terjadi berulang kali, sehingga dapat dibentuk ulang dalam berbagai bentuk melalui cetakan yang berbeda untuk mendapatkan produk polimer yang baru. Jenis plastik ini tidak memiliki ikatan silang antar rantai polimernya, melainkan dengan struktur molekul linear atau bercabang. (Haryanto, 2010).

Acrilonitrile Butadiene Styrene adalah termoplastik yang termasuk kedalam kelompok polystyrene dengan kekuatan yang tinggi. ABS ialah hasil dari polimerisasi *Styrene* dan *Acrilonitrile* di dalam polybutadiene. Acrilonitril adalah monomer sintesis yang dihasilkan dari propylene dan ammonia, butadiene adalah minyak hidrokarbon yang diperoleh dari fraksi C4 uap cracking, dan styrene monomer dibuat oleh dehidrogenasi dari etil benzene hidrokarbon yang diperoleh dalam reaksi etilen dan benzene. Proporsinya bias bermacam-macam dari 15% sampai 35% *acrylonitrile*, 5% sampai 30% *butadiene* dan 40% sampai 60% *styrene*. Sifat mekanis yang dimiliki pada plastik ABS ditandai dengan ketahanannya yang tinggi, ketahanan terhadap guncangan, kekuatan lentur, dan permukaan yang keras. Plastik ini masuk ke dalam kelompok yang mempunyai

kemampuan untuk membentuk property yang bermacam-macam dengan mengubah proporsi dari monomer tersebut, yang dapat menghasilkan keuntungan.

Aplikasi ABS adalah polimer organik pembentuk plastik yang cukup mempunyai kekuatan dengan harga yang relatif rendah. Beratnya yang ringan dan kemampuan untuk dibentuk dan diekstrusi membuatnya berguna dalam produk manufaktur seperti saluran limbah lubang AGD sistem pipa, alat musik, komponen otomotif, pelindung alat elektronik seperti speaker, peralatan medis untuk akses darah, peralatan dapur sampai dengan mainan anak – anak yakni Lego. Rumah tangga dan barang – barang industri konsumen adalah konsumen utama dari *Acrilonitrile Butadiene Styrene* (ABS) (Larasati, 2014).

Secara umum ABS memiliki karakteristik sebagai berikut (Quadrant Engineering Plastic Products, 2007) dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Data Sheet Karakteristik Filamen ABS
(Quadrant Engineering Plastic Products, 2007)

Flexural Strength	50-60	Mpa
Notched Impact Strength	10 - 20	Kj/m ²
Thermal Coefficient of expansion	70 - 90	x 10 ⁻⁶
Max Cont Use Temp	80 - 95	°C
Density	1.0 - 1.05	g/cm ³

2.2.6. Teori Uji Lentur (*Bending*)

Kekakuan adalah ketahanan suatu material terhadap deformasi elastis. Modulus Elastisitas (E) adalah harga kekakuan suatu material pada daerah elastis. Modulus elastis juga berarti perbandingan tegangan dengan regangan pada daerah elastis. Material yang lentur (tidak kaku) adalah material yang dapat mengalami regangan bila diberi tegangan atau beban tertentu. Tegangan atau beban yang diberikan pada spesimen uji haruslah dibawah harga beban maksimum agar spesimen tidak mengalami deformasi plastis. Untuk melakukan uji bending ada faktor dan aspek yang harus dipertimbangkan yaitu :

a) Spesimen Uji

Spesimen uji adalah suatu benda yang di uji kekuatan lengkungnya dengan menggunakan alat uji *bending*. Jenis material benda uji yang digunakan sebagai benda uji sangatlah berpengaruh dalam pengujian *bending*. Karena tiap jenis material memiliki kekuatan lengkung yang berbeda-beda, yang nantinya berpengaruh terhadap hasil uji *bending* itu sendiri.

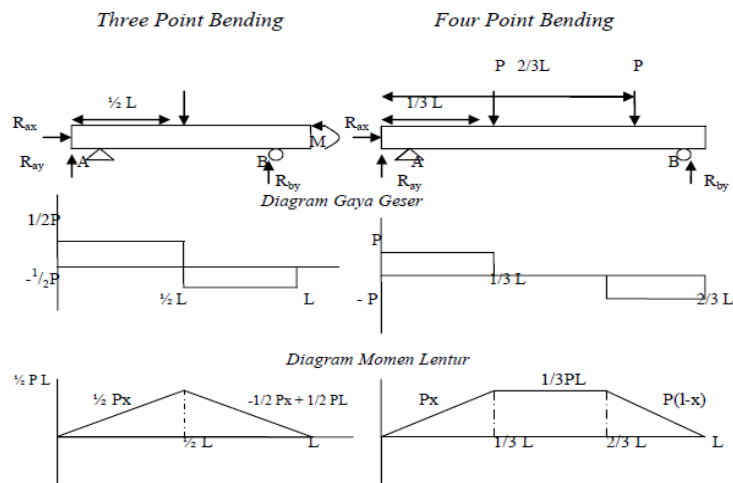
b) Rangka

Rangka berfungsi sebagai penahan kekuatan balik dari gaya tekan yang dihasilkan oleh alat penekan pada saat proses pengujian. Selain itu rangka juga berfungsi sebagai dudukan komponen-komponen lain, sehingga ukuran dari rangka haruslah lebih besar dari komponen-komponen tersebut.

c) Alat Ukur

Alat ukur berfungsi sebagai pembaca data hasil pengukuran pada saat pengujian berlangsung. Angka-angka yang di tunjukkan oleh alat ukur nantinya di olah lagi dalam perhitungan untuk mendapatkan data yang inginkan. Pada umumnya alat ukur yang digunakan adalah alat pengukur tekanan.

Uji lengkung (*bending test*) merupakan salah satu bentuk pengujian untuk menentukan mutu suatu material secara visual. Pada pengujian kekuatan lentur dan kekerasan dilakukan dengan pemberian beban pada material sehingga secara bersamaan mulai terbentuk tegangan tarik, tekan, dan geser. Beban tersebut akan maksimum pada permukaan spesimen, serta bernilai nol pada *neutral axis*-nya. Secara umum pengujian dilakukan dengan menggunakan dua tipe pembebanan, yakni: *3 point bending* dan *4 point bending*. Berikut ini merupakan skema pengujian keduanya beserta diagram gaya geser serta momen lenturnya. Saat material diberi beban pada daerah elastis, maka akan timbul tegangan pada penampang melintang sebagai akibat dari momen lentur. Skema dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skema Pengujian Bending

Ada perbedaan dari kedua cara pengujian ini, yaitu terletak pada bentuk dan jumlah point yang digunakan. Three point bending menggunakan 2 point pada bagian bawah yang berfungsi sebagai tumpuan dan 1 tumpuan pada bagian atas sebagai penekan sedangkan four point bending menggunakan 2 point pada bagian bawah yang berfungsi sebagai tumpuan dan 2 point pada bagian atas sebagai penekan. Dari

masing-masing cara pengujian memiliki kelebihan dan kekurangan. Dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2.Kelebihan dan Kekurangan Uji *Three Point Bending* dan *Four Point Bending* (Khamid, 2011)

<i>Three Point Bending</i>	<i>Four Point Bending</i>
Kelebihan	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kemudahan persiapan spesimen dan pengujian ✓ Pembuatan point lebih mudah 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Penggunaan rumus perhitungan lebih mudah ✓ Lebih akurat hasil pengujiannya
Kekurangan	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Kesulitan menentukan titik tengah persis, karena jika posisi tidak di tengah persis penggunaan rumus berubah ○ Kemungkinan terjadi pergeseran, sehingga benda yang diuji pecah/patah tidak tepat di tengah maka rumus yang digunakan kombinasi tegangan lengkung dengan tegangan geser 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pembuatan <i>point</i> lebih rumit ○ 2 point atas harus bersamaan menekan benda uji. Jika salah satu <i>point</i> lebih dulu menekan benda uji maka terjadi <i>three point bending</i>, sehingga rumus yang digunakan berbeda

Beberapa rumus atau formula yang digunakan dalam pengujian bending meliputi *flexural stress*, *flexural strain*, dan *flexural modulus* tersaji sebagai berikut :

Flexural Stress

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

F = Gaya yang diberikan (N)

L = Panjang span (mm)

b = lebar spesimen (mm)

h = Ketebalan spesimen (mm)

Flexural Strain

$$\epsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\epsilon_f = \frac{600sh}{L^2} \% \dots\dots\dots (2.3)$$

s = Defleksi (mm)

h = Ketebalan spesimen (mm)

L = Panjang span (mm)

Flexural Modulus

$$S_i = \frac{\epsilon_{fi}L^2}{6h} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f2}-\sigma_{f1}}{\epsilon_{f2}-\epsilon_{f1}} \dots\dots\dots (2.5)$$

S_i = Defleksi (mm)

ε_{fi} = Korespondensi flexural strain

L = Panjang span (mm)

h = Ketebalan spesimen (mm)

σ_1 = Tegangan lentur (MPa), pada defleksi S_1

σ_2 = Tegangan Lentur (MPa), pada defleksi S_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 dan SPSS.

2.2.8. Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan suatu metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu yang bersamaan menekan biaya dan sumber daya seminimal mungkin. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran itu dengan menjadikan produk atau proses “tidak sensitif” terhadap berbagai faktor seperti misalnya material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi – kondisi operasional. Metode Taguchi menjadikan produk atau proses bersifat kokoh terhadap faktor gangguan, karenanya metode ini disebut juga sebagai perancangan kokoh (*robust design*). (Soejanto, 2009 : 15-16). Pendekatan yang dikenalkan pada Metode Taguchi yakni 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 memiliki beberapa keunggulan dalam desain eksperimennya yakni, Metode Taguchi lebih efisien karena memungkinkan untuk melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan jumlah, memungkinkan diperolehnya suatu proses yang menghasilkan produk yang konsisten dan kokoh terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol, dan Metode taguchi menghasilkan kesimpulan mengenai respon faktor – faktor dan level dari faktor – faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum. Tetapi Metode Taguchi juga memiliki kekurangan dibandingkan dengan metode lain diantaranya adalah pada rancangannya mempunyai struktur yang sangat kompleks, dimana terdapat rancangan yang mengorbankan pengaruh interaksi dan ada pula rancangan yang mengorbankan pengaruh utama yang cukup signifikan. Sehingga untuk mengatasinya perlu dilakukan pemilihan rancangan percobaan 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. Bagian terpenting dari metode Matriks ortogonal terletak pada pemilihan kombinasi level variabel – variabel input pada masing – masing eksperimen. (Soejanto, 2009:17). Ada beberapa tahapan dalam desain eksperimen Taguchi menurut Soejanto (2009) yakni :

1. Tahap Perencanaan eksperimen merupakan tahap terpenting yang meliputi perumusan masalah, penetapan tujuan eksperimen, penentuan variabel tak bebas,

identifikasi faktor – faktor, pemisahan faktor kontrol dan faktor gangguan, penentuan jumlah level dan nilai level faktor, letak dari kolom interaksi, perhitungan derajat kebebasan, dan pemilihan matriks ortogonal.

2. Tahap Pelaksanaan eksperimen meliputi penentuan jumlah replikasi eksperimen dan randomisasi pelaksanaan eksperimen.
3. Tahap Analisa dilakukan untuk mengumpulkan, mengolah, menghitung serta menyajikan data dalam suatu layout tertentu sesuai dengan desain yang dipilih pada eksperimen. Beberapa tahapan analisis yang akan digunakan pada desain eksperimen Taguchi adalah sebagai berikut :

a) 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 ini adalah Rasio S/N menurut tipe karakteristik yang dituju pada penelitian :

1) Semakin kecil, semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non negatif. Nilai semakin kecil, (mendekati nol adalah yang diinginkan).

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \dots\dots\dots(2.6)$$

n = jumlah pengulangan dari suatu trial

y_i = data pengamatan ke - i

2) Tertuju pada nilai tertentu

Adalah karakteristik kualitas dengan nilai atau target tidak nol dan terbatas. Dengan kata lain nilai yang mendekati suatu nilai yang ditentukan adalah yang terbaik.

$$S/N = 10 \log_{10} \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \dots \dots \dots (2.7)$$

μ = mean

σ = deviasi

3) Semakin besar, semakin baik

Adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non negatif. Nilai semakin besar adalah semakin diinginkan.

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

n = jumlah pengulangan dari suatu trial

y_i = data pengamatan ke – i

b) *Analysis of Variance* (ANOVA)

Analisis varians pada metode Taguchi digunakan sebagai suatu model statistik untuk menginterpretasikan data – data hasil eksperimen. Menurut Soejanto, (2009) ANOVA atau analisis varians adalah teknik perhitungan yang memungkinkan secara kuantitatif memperkirakan kontribusi dari setiap faktor pada semua pengukuran respon. Analisis varians yang digunakan pada desain parameter berguna untuk mengidentifikasi kontribusi faktor, sehingga akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis varians pada *orthogonal array* dilakukan dengan perhitungan yang berdasarkan jumlah kuadrat (*sum of square*) pada masing masing kolom. Adapun 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 dalam rumus sebagai berikut :

$$Sq_T = \sum_{i=1}^N y^2 \dots\dots\dots(2.9)$$

keterangan :

N : jumlah percobaan

y : data yang diperoleh dari percobaan

2) Jumlah Kuadrat Faktor A (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 dalam rumus sebagai berikut:

$$Sq_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \dots\dots\dots(2.10)$$

keterangan :

A_i : level ke i pada faktor A

n_{A_i} : jumlah percobaan untuk level ke i pada faktor 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 dalam rumus sebagai berikut:

$$Sq_e = Sq_T - Sq_A \dots\dots\dots(2.11)$$

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 dalam rumus sebagai berikut:

$$Sq_m = n \times y^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

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 dalam rumus sebagai berikut:

$$St = Sq_m + Sq_e \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

Sq_m : jumlah kuadrat karena rata – rata

Sq_e : jumlah kuadrat karena error

c) Persen Kontribusi

Persen kontribusi merupakan porsi masing-masing faktor dan atau interaksi faktor yang signifikan terhadap total variansi yang diamati. Persen kontribusi ini merupakan fungsi dari jumlah *sum of squares* dari masing-masing faktor signifikan yang merupakan indikasi kekuatan relatif dalam mengurangi variansi. Rumus perhitungan persen kontribusi adalah sebagai berikut :

$$Sq'A = SqA - (Mqe \times DfA) \dots\dots\dots(2.14)$$

$$\rho = \frac{Sq'A}{St} \times 100\% \dots\dots\dots(2.15)$$

keterangan:

Sq'A : jumlah kuadrat murni untuk faktor A

SqA : *sum of squares* faktor A

Mqe : mean squares error

DfA : derajat kebebasan faktor A

St : *sum of squares* total faktor

Pada persen kontribusi akan dihitung persen kontribusi faktor maupun interaksi faktor yang signifikan error. Jika persen kontribusi error $\leq 15\%$ maka berarti tidak ada factor yang berpengaruh. Tetapi jika persen kontribusi error $\geq 50\%$ artinya bahwa terdapat factor yang berpengaruh dan nilai yang ada terlalu besar. (Soejanto, 2009 : 30).

d) Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi adalah percobaan yang dilakukan untuk memeriksa kesimpulan yang didapat pada analisis SNR. Adapun langkah-langkah pada eksperimen konfirmasi adalah sebagai berikut :

- 1) Merancang kondisi optimum untuk factor dan level yang signifikan
- 2) Membandingkan rata – rata dan variasi hasil percobaan konfirmasi dengan rata – rata dan variansi yang diharapkan.

Setelah langkah – langkah seperti diatas dilakukan, selanjutnya adalah analisis eksperimen konfrmasi. Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil jika terjadi perbaikan dari hasil proses yang ada (setelah eksperimen Taguchi dilakukan) dan hasil dari eksperimen konfirmasi dekat dengan nilai yang diprediksi.