

**LAPORAN KEMAJUAN PENELITIAN YANG DIAJUKAN
KE LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT**



**APLIKASI FACTORIAL DESIGN GUNA PENINGKATAN KARAKTERISTIK
FISIK PRODUK HASIL 3D PRINTER**

Disusun oleh:

Ketua Tim

Lithrone Laricha S, S.T., M.T. [0321078301/10306003]

Anggota:

Ir. Wilson Kosasih, M.T.[10305004]

Carla Olivia Doaly,S.T.,M.T. [10317001]

Edalia Wijaya Putri [545160036]

PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TARUMANAGARA
JAKARTA
TAHUN 2020

**HALAMAN PENGESAHAN
PROPOSAL PENELITIAN
Semester Genap / Tahun 2020**

1. Judul : APLIKASI *FACTORIAL DESIGN* GUNA PENINGKATAN KARAKTERISTIK FISIK PRODUK HASIL 3D PRINTER
2. Ketua Tim
- a. Nama dan Gelar : Lithrone Laricha S, S.T., M.T.
 - b. NIDN/NIK : 0321078301 / 10306003
 - c. Jabatan/Gol : Dosen Tetap Prodi Teknik Industri / III C
 - d. Program Studi : Teknik Industri
 - e. Fakultas : Teknik
 - f. Bidang Keahlian : Quality & Productivity Engineering
 - g. Alamat Kantor : Kampus 1 Universitas Tarumanagara, Jl Letjend S. Parman No.1
 - h. Nomor HP/Tlp/Email : 0812-106-3447 / 021-5672548 ext. 381
3. Anggota Tim Penelitian
- a. Jumlah Anggota : Dosen 2 orang
 - b. Nama Anggota I/Keahlian : Ir. Wilson Kosasih, M.T./Quality&Productivity Eng.
 - c. Nama Anggota II/Keahlian : Carla O D, S.T., M.T/
 - d. Jumlah Mahasiswa : 1 orang
 - e. Nama Mahasiswa/NIM : Edalia Wijaya Putri/545160036
4. Lokasi Kegiatan Penelitian : Jakarta Barat dan laboratorium UNTAR
5. Luaran yang dihasilkan : Laporan penelitian, Jurnal, Bahan ajar
6. Jangka Waktu Pelaksanaan : Januari- Juni/~~Juli-Desember~~ 2020
7. Biaya Yang Disetujui LPPM : Rp. 10.000.000,-

Jakarta, 31 Juli 2020

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik

Ketua



Harto Tanujaya, S.T., M.T., Ph.D.
NIK: 10300013

Lithrone Laricha S, S.T., M.T.
NIK: 10306003

Menyetujui,
Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat

Jap Tji Beng, Ph.D
NIDN/NIK : 0323085501/10381047

RINGKASAN

Penggunaan 3D printer dewasa ini berkembang cukup pesat di Indonesia walaupun merupakan teknologi yang masih dikenal baru di Indonesia. Hal ini menyebabkan 3D printer akan terus mengalami perkembangan dan banyak hal yang harus diperbaharui. Masalah yang ditemukan dalam proses penggunaan alat ini adalah tidak adanya standar mengenai nilai setting pada beberapa parameter yang digunakan oleh mesin 3D Printer sehingga dapat mempengaruhi kekuatan produk hasil cetak dari 3D printer. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisa pemilihan faktor yang mempengaruhi kekuatan produk yang dihasilkan mesin 3D printer dan akan ditentukan kombinasi faktor yang optimal untuk menghasilkan kekuatan produk yang maksimal. Penelitian ini menggunakan perancangan eksperimen dengan pendekatan metode Factorial Design untuk mendapatkan nilai setting optimal pada mesin 3D printer sehingga dihasilkan produk dengan hasil cetak yang memiliki nilai kuat tarik maksimal. Beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini dan memiliki pengaruh terhadap kekuatan produk adalah suhu nozzle, layer thickness, suhu heatbed, dan infill pattern. Melalui penelitian ini dapat diketahui faktor yang paling mempengaruhi kekuatan dari produk yang dihasilkan oleh mesin 3D printer. Berdasarkan penelitian yang dilakukan berbasis metode perancangan eksperimen, maka didapatkan nilai setting optimal pada suhu nozzle 220°C, layer thickness 0,1 mm, suhu heatbed 40°C, dan infill pattern dengan jenis cubic. Sedangkan untuk kualitas produk hasil cetak 3D nilai beban maksimum sebesar 33,125 KgF adalah yang paling baik.

Kata kunci: *3D Printer, Perancangan eksperimen, Faktorial Desain, Nilai Setting Optimal*

PRAKATA

Puji syukur pada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat dan karunia-Nya yang tak terbatas, sehingga laporan penelitian yang berjudul “APLIKASI FACTORIAL DESIGN GUNA PENINGKATAN KARAKTERISTIK FISIK PRODUK HASIL 3D PRINTER” dapat diselesaikan sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan.

Pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Wilson Kosasih, S.T., M.T.,IPM, Ibu Carla O Doaly,S.T.,M.T. dan Saudara Edalia selaku rekan satu team yang membantu dalam penyelesaian penelitian ini.
2. Direktur DPPM dan Team Reviewer Universitas Tarumanagara

Penulis berharap penelitian ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Mohon maaf apabila ada kesalahan dalam penulisan laporan ini, kritik dan saran akan selalu diterima untuk perbaikan dalam penulisan mendatang.

Jakarta, 31 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI.....
DAFTAR TABEL *.....
DAFTAR GAMBAR*.....
DAFTAR LAMPIRAN *.....

BAB I PENDAHULUAN

3D printer adalah salah satu mesin dimana objek tiga dimensi dihasilkan dengan meletakkan lapisan demi lapisan dari material filamen yang dilelehkan dengan suhu panas. 3D Printer terdiri dari berbagai jenis. Jenis 3D Printer berbasis FDM (*Fused Deposition Modeling*) lebih umum digunakan saat ini, serta juga memiliki harga yang lebih murah (Durgun dkk, 2014). Namun 3D Printer berbasis FDM terbatas pada jenis material yang dapat dihasilkan, 2 jenis yang paling sering ditemukan adalah ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) dan PLA (*Poly Lactic Acid*) yang mana keduanya merupakan jenis material plastik yang memiliki kekuatan lebih rendah dibanding dengan material lain seperti logam. Sedangkan perkembangan 3D Printer saat ini semakin luas, objek dari 3D Printer bukan hanya sebagai prototype akan tetapi juga sebagai benda akhir fungsional (Tontowi, 2013).

Salah satu contoh benda fungsional yang berhasil diwujudkan lewat 3D Printer adalah rangka sepeda dengan bahan PLA, hal ini dapat dilihat pada artikel yang ditulis dan dipublikasi oleh Coxworth (2015). Contoh benda fungsional lainnya adalah kaki palsu untuk difabel dan orthosis untuk anak dengan Spastic Dipelgia Celebral Palsy seperti dapat dilihat pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Kaki Palsu Difable
(sumber : www.alatbantu.com)

Karena produk 3D Printer akan memiliki sifat fungsional, maka kekuatan adalah salah satu aspek yang perlu diperhatikan, maka diperlukan banyak preferensi untuk dapat diketahui faktor apa saja dan berapa nilai optimalnya untuk menghasilkan produk hasil cetak 3D Printer yang berkekuatan maksimal. Maka penelitian ini akan melengkapi preferensi sejenis yang telah ada sebelumnya dengan melengkapi kekurangan yang ada. Pada penelitian ini akan digunakan PLA sebagai objek bahan. Pemilihan bahan PLA pada penelitian ini karena selain kekuatan yang lebih rendah dibanding kebanyakan material lain, bahan plastik juga sering kali menjadi isu dalam masalah pencemaran, hal ini dikarenakan plastik sulit terurai dalam lingkungan. Maka dari itu, penelitian ini akan terfokus pada bahan PLA yang memiliki beberapa keunggulan dibanding bahan ABS, salah satunya yaitu sifatnya yang biodegradable sehingga lebih ramah lingkungan karena dibuat dari bahan alami namun dengan proses kimia, sehingga dapat terurai lebih cepat di lingkungan.

Berdasarkan berbagai masalah diatas, maka dapat diketahui bahwa terdapat kurangnya informasi mengenai parameter setting optimal 3D Printer yang dapat membuat kekuatan produk hasil cetak 3D Printer tidak maksimal. Melalui penelitian ini akan dilakukan analisa pemilihan faktor yang mempengaruhi kekuatan produk yang dihasilkan dan akan ditentukan kombinasi faktor yang optimal untuk menghasilkan kekuatan produk yang maksimal. Kombinasi faktor yang dipilih dan metode yang digunakan akan berbeda dari penelitian sejenis yang telah ada, hal ini bertujuan supaya penelitian ini dapat melengkapi dari penelitian preferensi sejenis yang telah ada sebelumnya.

Melalui penelitian ini dapat dilakukan identifikasi jenis setting dan interaksi kombinasinya yang berpengaruh secara signifikan terhadap kekuatan produk yang dihasilkan oleh 3D Printer, serta dapat diketahui secara lengkap usulan nilai kombinasi jenis setting yang optimal untuk menghasilkan kekuatan produk yang maksimal. Adapun beberapa batasan dalam penelitian ini diantaranya penelitian ini dilakukan pada mesin 3D Printer berbasis FDM (*Fused Deposition Modeling*) dengan tipe Cartesian, dan pada penelitian akan digunakan bahan filamen PLA. Adapun beberapa faktor lain diluar nilai setting tidak dipertimbangkan, yaitu seperti suhu ruangan dan kualitas merek filamen.

Manfaat yang bisa diperoleh melalui penelitian ini adalah diharapkan hasil penelitian yang diperoleh kedepannya dapat menjadi preferensi bagi Perusahaan, UMKM, dan Laboratorium yang menggunakan 3D Printer (terutama 3D Printer berbasis FDM tipe Cartesian) sebagai salah satu alat utama produksi agar dapat memperhatikan parameter setting yang berpengaruh untuk meningkatkan kualitas kekuatan produk yang dihasilkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 3D Printer

3D printer adalah salah satu mesin dimana objek tiga dimensi dihasilkan dengan meletakkan lapisan demi lapisan dari material filamen yang dilelehkan dengan suhu panas. 3D Printer terdiri dari berbagai jenis. Jenis 3D Printer berbasis FDM (*Fused Deposition Modeling*) lebih umum digunakan saat ini, serta juga memiliki harga yang lebih murah (Durgun dkk, 2014). Ada berbagai teknologi pencetakan 3D dan bahan-bahan yang dapat digunakan, tetapi semuanya berdiri pada prinsip dasar yang sama yaitu model digital diubah menjadi objek fisik tiga dimensi yang solid dengan menambahkan material lapis demi lapis.

Langkah dalam proses pencetakan dalam 3D printer dimulai dari melakukan desain dan menjadi *file* desain 3D digital, *file* desain ini kemudian akan ditransfer kedalam *software* yang akan mengonversi file tersebut menjadi lapisan-lapisan tipis yang kemudian dikirim ke 3D Printer untuk dicetak. Proses pencetakan dapat dilakukan dengan berbagai cara kerja (variasi teknologi), mulai dari bagian *extruder* 3D Printer yang melelehkan bahan plastik dan meletakkannya ke alas dalam bentuk lapisan demi lapisan, adapula untuk mesin industri besar yang menggunakan laser untuk melebur bubuk logam secara selektif pada suhu tinggi. Pencetakan dapat memakan waktu berjam-jam untuk diselesaikan tergantung pada ukuran dan *setting* pada mesin atau *software*.

Bahan yang tersedia juga bervariasi berdasarkan jenis printer, mulai dari plastik hingga karet, batu pasir, logam dan paduan yang semakin banyak bahan muncul di pasar setiap tahun. Terdapat beberapa jenis 3D Printer yaitu:

- 1) *Fused Deposition Modeling* (FDM)
- 2) *Stereolithography* (SLA)
- 3) *Digital Light Processing* (DLP)
- 4) *Selective Laser Sintering* (SLS)
- 5) *Selective Laser Melting* (SLM)
- 6) *Electronic Beam Melting* (EBM)
- 7) *Laminated Object Manufacturing* (LOM)
- 8) *Binder Jetting* (BJ)
- 9) *Material Jetting* (MJ)

Specifications		Electrical Parameters	
Print Technique	: FDM	Storage temperature	: 0~32 °C (32-90 °F)
Printing Area MAX	: 210 x 210 x 190 (MM)	Operating temperature	: 15~32 °C (60-90 °F)
Layer Resolution	: 0.1-0.5	Input Voltage	: 50/60HZ 220V/120V
Setting Accuracy	: XY:0.02 Z:0.02	Output Voltage	: 24v
Nozzle Diameter	: 0.4MM	Maximum Power	: 360W
Hot End Heating	: 280°C		
Hot Bed Heating	: 130°C		
Mechanical Parameters		Software	
Architecture	: Aluminum & Acrylic	Software package	: REPETIER-HOST
Platform	: Aluminum	File format	: G-CODE STL
XYZ bearing	: Bearing Steel	Operating system	: MAC LINUX WINDOW
Stepper Motor	: 1.8°- 1/16	Connection mode	: USB
Extruder	: Mk8 Upgrade Assembly	LCD display & Control	: YES
Use filament	: 1.75MM	SD Card Print	: YES

Gambar 2.1 Spesifikasi 3D Printer Sunhokey Prusa I4

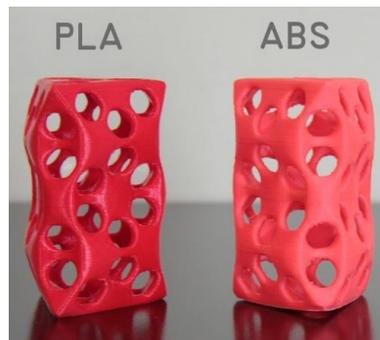
Gambar 2.1 adalah spesifikasi 3D printer yang digunakan dalam penelitian ini. 3D Printer berbasis FDM memiliki beberapa jenis material yang dapat digunakan, dua yang paling umum yaitu plastik berjenis PLA (*Poly Lactic Acid*) dan ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). Untuk perbedaan spesifikasi dari PLA dan ABS dapat dilihat pada Tabel 2.1. Keterangan untuk masing masing jenis plastik adalah sebagai berikut:

1) PLA (*Poly Lactic Acid*)

PLA (*Poly lactic Acid*) adalah termoplastik *biodegradable* (pada kondisi yang sesuai) yang berasal dari sumber daya yang *renewable* seperti pati jagung atau tebu. PLA adalah salah satu bioplastik yang paling populer, digunakan untuk banyak aplikasi mulai dari cangkir plastik hingga implan medis. Bioplastik dirancang untuk memudahkan proses degradasi terhadap reaksi enzimatik mikroorganisme seperti bakteri dan jamur (Avella, 2009). PLA merupakan polimer yang cukup menjanjikan karena dihasilkan dari polimerisasi asam laktat dari fermentasi ubi kayu (Yuwono dkk, 2010). Adanya bahan penguat/pengisi tersebut dalam biopolimer (dalam hal ini, pati) akan memberikan pengaruh pada sifat-sifat komposit yang terbentuk (Ebrahimnejad dkk, 2009). PLA memiliki suhu lebur yang lebih rendah dan lebih ramah lingkungan dibanding ABS, kuat tarik PLA juga lebih baik dibanding ABS.

2) ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) adalah termoplastik umum yang dikenal di industri injection molding. Ini digunakan untuk aplikasi seperti LEGO, *housing* elektronik, dan suku cadang otomotif. Namun aroma ABS ketika dipanaskan tidak baik untuk kesehatan, sehingga bersifat lebih *toxic* jika dibandingkan dengan PLA.



(Sumber: www.fabtotum.com)

Gambar 2.2 Hasil Cetak 3D Bahan Filamen PLA dan ABS

Tabel 2.1. Karakteristik Perbedaan PLA dan ABS

Properties*	ABS	PLA
Tensile Strength**	27 MPa	37 MPa
Elongation	3.5 - 50%	6%
Flexural Modulus	2.1 - 7.6 GPa	4 GPa
Density	1.0 - 1.4 g/cm ³	1.3 g/cm ³
Melting Point	N/A (amorphous)	173 °C
Biodegradable	No	Yes, under the correct conditions
Glass Transition Temperature	105 °C	60 °C
Common Products	LEGO, electronic housings	Cups, plastic bags, cutlery

(Sumber: www.makeitfrom.com)

3D Printer berbasis FDM dibagi menjadi beberapa tipe berdasarkan sistem gerakannya, yaitu:

1) Cartesian

Printer 3D Cartesian adalah printer FDM 3D yang paling umum ditemukan di pasar. Berdasarkan sistem koordinat Cartesian dalam matematika, teknologi ini

menggunakan tiga-sumbu: X, Y, dan Z untuk menentukan posisi dan arah *extruder* yang tepat. Dengan jenis printer ini, alas pencetakan biasanya hanya bergerak pada sumbu-Z, dengan *extruder*, bekerja dua dimensi pada bidang X-Y.

2) Delta

Mesin-mesin ini beroperasi dengan koordinat Cartesian, namun alasnya berbentuk bulat dan dikombinasikan dengan *extruder* yang dipasang pada tiga titik seperti titik pada segitiga. Masing-masing dari tiga titik tersebut kemudian bergerak ke atas dan ke bawah, dengan demikian dapat membuat gerakan *extruder* bebas pada koordinat X, Y, dan Z.

3) Polar

3D Printer tipe ini masih tergolong jarang ditemukan dipasaran. Pemosisian 3D Printer Polar tidak ditentukan oleh koordinat X, Y, dan Z, tetapi dengan sudut dan panjang. Ini berarti bahwa alas yang berbentuk bulat berputar dan bergerak pada saat yang sama, dengan *extruder* yang hanya bergerak ke atas dan ke bawah.

2.2. Variable atau Parameter Pada Mesin 3D printer

Parameter utama yang terdapat pada mesin 3D printer untuk dapat dipertimbangkan sebagai faktor uji adalah sebagai berikut:

a. *Layer thickness/layer height*

Layer thickness adalah ketebalan setiap lapisan yang terbentuk pada produk hasil cetak 3D Printer. Semakin kecil *layer thickness*, maka semakin halus permukaan produk hasil cetak. Gambar 2.3 dibawah ini adalah merupakan gambar perbedaan *layer thickness* pada hasil produk.

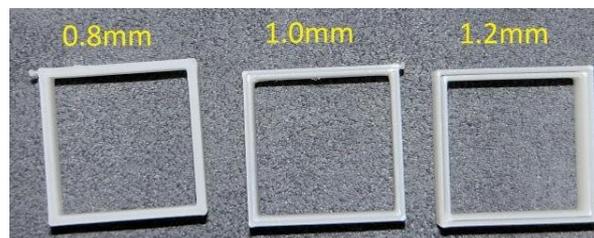


(Sumber: all3dp.com)

Gambar 2.3 Perbedaan *Layer Thickness* Pada Hasil Produk

b. *Shell (Wall Thickness dan Top/bottom Thickness)*

Wall thickness adalah ketebalan bagian pinggir produk, sedangkan *top/bottom thickness* adalah ketebalan bagian atas dan bawah produk. Kepadatan *wall thickness* dan *top/bottom thickness* tidak terpengaruh dari *infill density*, maka *wall thickness* dan *top/bottom* akan bersifat padat dan menambah kekuatan produk. Gambar 2.4 dibawah ini adalah gambar perbedaan *Wall Thickness* pada hasil produk.



(Sumber: www.pinterest.pt)

Gambar 2.4 Perbedaan *Wall Thickness* Pada Hasil Produk

c. *Suhu Nozzle/Extruder*

Suhu *nozzle* adalah suhu bagian yang melelehkan filamen. Suhu ini disesuaikan dan didukung stabilitasnya dengan adanya sensor suhu. agar sekalipun suhu lingkungan dapat mempengaruhi suhu *nozzle*, suhu *nozzle* akan tetap berada pada nilai yang diinginkan karena akan terus disesuaikan dengan bantuan sensor suhu.

d. *Suhu Heatbed*

Suhu *heatbed* adalah suhu bagian alas cetak, jika suhu terlalu rendah maka hasil cetak dapat mengkerut dan terangkat dari alas. Seperti halnya suhu *nozzle*, suhu *heatbed* ini juga didukung stabilitasnya dengan adanya sensor suhu.

e. *Print speed*

Print speed adalah kecepatan gerakan bagian 3D Printer saat melakukan *print* (saat mengeluarkan filamen).

f. *Fan speed*

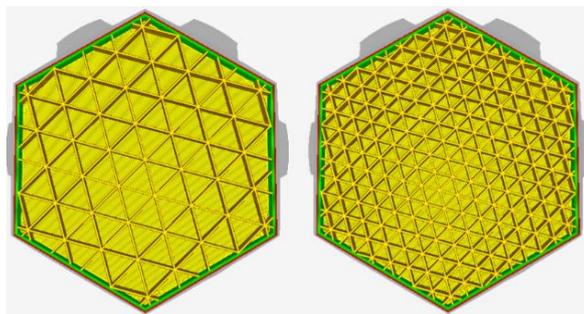
Fan speed adalah kecepatan putaran kipas yang berfungsi untuk mendinginkan filamen yang telah dicetak. *Fan speed* tersedia dalam satuan persen (%). Suhu lingkungan dapat ikut mempercepat/memperlambat pendinginan karena *fan speed* tidak seperti *setting* suhu yang memiliki sensor yang dapat menyesuaikan dari gangguan lingkungan/luar.

g. *Infill Pattern*

Infill pattern adalah arah serat bagian dalam produk hasil cetak 3D. Pada *software* Ultimaker Cura terdapat 13 jenis *infill* yang dikelompokkan dalam 4 kategori, yaitu Strong 2D Infill (untuk print sehari-hari, Quick 2D Infills (cepat namun lemah), Strong 3D Infill (membuat objek kuat secara merata dari segala arah), dan Flexible 3D Infill (untuk material yang fleksibel). Karena tujuan penelitian ini mengarah kepada kuat tarik produk, maka digunakan jenis *infill* yang tergolong dalam Strong 3D Infill yaitu *Cubic*, *Cubic (subdivision)*, *Octet*, dan *Quarter Cubic*.

h. *Infill Density*

Infill density merupakan kepadatan *infill* yang dihasilkan pada objek. Semakin tinggi *infill density* maka akan semakin padat dan kuat produk, namun akan semakin banyak bahan yang digunakan dan semakin lama waktu yang dibutuhkan.



(Sumber: <https://ultimaker.com>)

Gambar 2.5 Perbedaan *Infill Pattern* Pada Hasil Produk

i. Orientasi Objek

Orientasi objek merupakan posisi sudut objek terhadap alas cetak. Acuan garis sudut pada objek dapat berbeda-beda. Berbagai variasi orientasi objek Orientasi Objek Secara *Flat*, *On-Edge*, dan *Upright* dan Orientasi Objek Sesuai *Raster Angle*.

2.3. Uji ANOVA

Analysis of variance atau ANOVA merupakan salah satu uji parametrik yang berfungsi untuk membedakan nilai rata-rata lebih dari dua kelompok data dengan cara membandingkan variansinya (Ghozali, 2009). Analisis varian dapat dilakukan untuk menganalisis data yang berasal dari berbagai macam jenis dan desain penelitian. Analisis varian banyak dipergunakan pada penelitian-penelitian yang banyak melibatkan pengujian komparatif yaitu untuk menguji variabel terikat dengan cara membandingkannya pada kelompok sampel percobaan yang diamati. Analisis varian saat ini banyak digunakan dalam penelitian survey dan penelitian eksperimen. Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung Anova satu arah pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 ANOVA *Single Factor*

Source of Variation	Sum of Square	DoF	Mean Square	Fo
Between Treatment	$SS_{treatment}$ $= N \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_L)^2$	a-1	$MS_{treat} = \frac{SS_{treat}}{dof}$	$Fo = \frac{MS_{treat}}{MS_e}$
Error (Within Treatment)	$SS_e = SS_T - SS_{treatment}$	N-a	$MS_e = \frac{SS_e}{dof}$	
Total	SS_T $= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y}_L)^2$	N-1		

2.4. Factorial Design

Banyak eksperimen yang dilakukan dengan melibatkan dua atau lebih faktor. Dengan desain faktorial, maka setiap kemungkinan level kombinasi dari semua faktor akan diselidiki. Sebagai contoh, apabila terdapat a level dari faktor A dan b level dari faktor B, maka replikasi percobaan akan dilakukan untuk setiap kombinasi ab. Faktor yang dikombinasikan pada desain faktorial ini seringkali disebut *crossed*. Efek dari suatu faktor didefinisikan sebagai respons yang dihasilkan dari perubahan level faktor tersebut. Hal ini seringkali disebut sebagai efek utama karena mengacu pada faktor primer dari percobaan. Selain efek utama, terdapat pula efek interaksi yaitu perbedaan antara efek satu faktor pada level yang berbeda dari faktor lainnya.

Penggunaan desain faktorial dalam perancangan suatu eksperimen tentunya memiliki beberapa kelebihan maupun kekurangan. Berikut ini adalah beberapa hal yang menjadi dasar pertimbangan (Salomon, 2015):

1. Kelebihan
 - a. Lebih efisien dalam menggunakan sumber-sumber yang ada.
 - b. Informasi yang diperoleh lebih komprehensif karena kita bisa mempelajari pengaruh utama dari interaksi.
 - c. Hasil percobaan dapat diterapkan dalam suatu kondisi yang lebih luas karena kita mempelajari kombinasi dari berbagai factor.
2. Kekurangan
 - a. Analisis statistika menjadi lebih kompleks.
 - b. Terdapat kesulitan dalam menyediakan satuan percobaan yang relative homogen.
 - c. Pengaruh dari kombinasi perlakuan tertentu mungkin tidak berarti apa apa sehingga terjadi pemborosoan sumber daya yang ada.

Rancangan percobaan dengan desain faktorial ini pada umumnya mempunyai tiga tujuan utama yaitu:

1. Mengukur pengaruh variabel terhadap hasil
2. Menentukan variabel yang paling berpengaruh terhadap hasil
3. Mengukur interaksi antar-variabel terhadap hasil

2.5. General Factorial Design

General factorial design merupakan hasil dari two factor factorial design yang diextensikan kedalam kasus general dimana terdapat a level dari faktor A, b level dari faktor B, c level dari faktor C dan seterusnya yang diatur dalam percobaan faktorial. Secara umum, akan terdapat abc...n total observasi jika ada n replikasi untuk percobaan secara menyeluruh. Dalam pelaksanaan general factorial design, jumlah replikasi yang harus dilakukan paling sedikit adalah 2 replikasi ($n \geq 2$) untuk menentukan jumlah kuadrat total karena kesalahan yang mungkin terjadi pada seluruh interaksi didalam model.

Sebagai contoh untuk model 3 faktor analysis of variance sebgai berikut:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, n \\ k = 1, 2, \dots, n \\ l = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Dimana:

μ = efek rata rata keseluruhan

τ_i = efek faktor A pada level ke i

β_j = efek faktor B pada level ke j

γ_k = efek faktor C pada level ke k

$\tau\beta$ = efek interaksi faktor A dengan B

$\tau\gamma$ = efek interaksi faktor A dengan C

$\beta\gamma$ = efek interaksi faktor B dengan C

$\tau\beta\gamma$ = efek interaksi faktor A, faktor B dan faktor C

ε = error

Jika seluruh faktor pada experiment adalah tetap, maka dapat dilakukan formulasi dan pengujian hipotesis mengenai efek utama dan interaksi faktor dengan menggunakan analisis ANOVA. Berikut merupakan rumus yang digunakan dalam perhitungan faktorial design yang dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Rumus Faktorial Design untuk 3 Faktor
(Sumber : Montgomery, 2013)

Source of Variation	Sum of Square	DoF	Mean Square	Fo
A	SS_A	$(a - 1)$	MS_A	$Fo = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$(b - 1)$	MS_B	$Fo = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$(c - 1)$	MS_C	$Fo = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MS_{AB}	$Fo = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	MS_{AC}	$Fo = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	MS_{BC}	$Fo = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	MS_{ABC}	$Fo = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(n - 1)$	MS_E	
Total	SS_T	$abcn - 1$		

Dimana, formula untuk menghitung jumlah kuadrat total (SS_T) dapat dihitung seperti biasa:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

Dengan jumlah kuadrat total (*Sum of square*) untuk efek utama dapat ditemukan dari total untuk faktor A ($y_{i\dots}$), B($y_{\dots j}$), C($y_{\dots k}$):

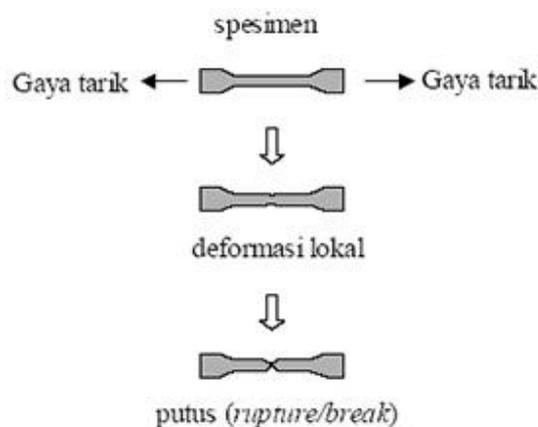
$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{\dots j}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{acn} \sum_{k=1}^c y_{\dots k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

2.6 Uji Tarik (*Tensile Test*)

Setiap jenis material atau bahan memiliki sifat dan karakter yang berbeda-beda, salah satunya adalah kekuatan. Untuk mengetahui sifat dari suatu material maka diperlukan suatu pengujian. Salah satu jenis uji yang paling sering dilakukan untuk mengetahui kekuatan bahan yaitu **uji tarik (*tensile test*)**. Prinsipnya, uji tarik dilakukan menggunakan mesin yang dapat memberikan gaya tarik yang cukup kuat pada material yang dijepit. Dengan memberikan gaya tarik pada material sampai putus, maka dapat diketahui berbagai informasi, salah satunya adalah beban tarik maksimum yang dapat ditahan oleh material yang diuji tepat sebelum putus. Berikut merupakan gambaran mengenai specimen dan proses uji tarik yang dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Spesimen Uji Tarik

Pada uji ini, spesimen uji diberi beban dengan kenaikan beban sedikit demi sedikit hingga spesimen uji tersebut patah, pada mesin uji tarik yang digunakan akan muncul nilai beban dalam satuan KgF (Kilogram-Force), nilai beban ini nantinya akan dihitung dan dikonversi menjadi satuan nilai kuat/tegangan tarik dalam satuan MPa (Mega-Pascal). Berikut adalah rumus yang digunakan untuk menghitung nilai kuat tarik.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Dimana :

σ = *Stress*/ kuat tarik (Mpa)

F = Beban Maksimum (N)

A = Luas Penampang (mm²)

BAB III

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan dan dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi Literatur dan Studi Lapangan

Adalah studi yang dilakukan melalui jurnal dan buku yang terkait, studi lapangan juga dilakukan melalui pencarian terhadap beberapa UMKM yang menjual jasa 3D Print untuk melihat jenis produk yang umum dibuat oleh mereka. Hal ini dimaksudkan untuk menentukan latar belakang masalah yang ada.

2. Menentukan Topik Penelitian

Setelah mengetahui berbagai masalah yang ada melalui latar belakang maka dapat ditentukan topik penelitian terkait masalah yang ada dan akan dibahas dengan berdasarkan dari penelitian-penelitian yang telah ada sebelumnya.

3. Identifikasi Masalah, Penentuan Tujuan Penelitian , dan Penentuan Batasan Masalah

Identifikasi masalah dilakukan untuk memperjelas masalah-masalah yang akan selesaikan melalui penelitian ini. Setelah mengidentifikasi masalah, selanjutnya menentukan tujuan penelitian agar memperjelas output dari penelitian ini. Kemudian dilanjutkan dengan menentukan batasan-batasan masalah yang ada.

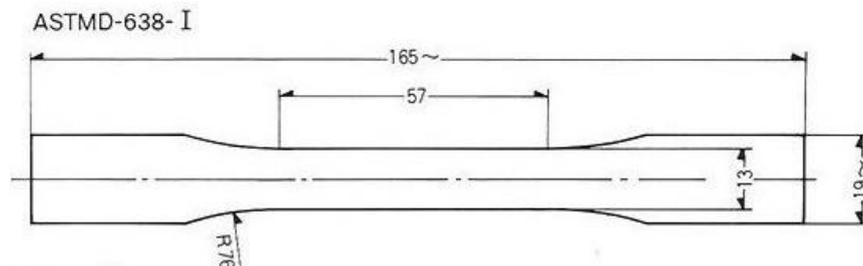
4. Pengumpulan Data Awal

Data awal diperoleh dengan cara menguji kekuatan produk hasil cetak 3D printer yang sudah ada saat ini. Hal ini dilakukan untuk dapat mengetahui nilai kualitas produk yang ada sehingga nantinya dapat dibandingkan dengan hasil akhir yang diperoleh melalui penelitian ini. Tabel 3.1 adalah nilai setting default/reguler berdasarkan penelitian yang sudah ada. Nilai suhu nozzle, suhu heatbed, print speed, orientasi objek, infill density, layer thickness, dan fan speed didapat dari setting bawaan software. Jenis infill pattern dipilih berdasarkan bentuk yang paling sederhana sehingga diasumsikan sebagai jenis infill pattern yang umum dipakai diantara jenis pattern tipe Strong 3D Infill lainnya, hal ini dikarenakan tidak ada acuan khusus mengenai pemilihan infill pattern.

Tabel 3.1 Nilai *Setting Default/Reguler*

Jenis <i>Setting</i>	Nilai <i>Default</i>
Suhu <i>Nozzle</i>	200° C
<i>Layer thickness</i>	0,2 mm
Suhu <i>Heatbed</i>	60° C
<i>Infill pattern</i>	Cubic
Orientasi Objek	0°
<i>Print speed</i>	60 mm/s
<i>Infill Density</i>	20%
<i>Fan Speed</i>	100%

Setelah didapat nilai setting reguler/default, maka dilakukan pembuatan spesimen uji standar ASTM D638 Type I berdasarkan data tersebut. Gambar ASTM D638 Type I beserta ukurannya dapat dilihat pada Gambar 3.1. Ukuran dalam millimeter (mm). Ini adalah standar specimen untuk uji kuat tarik (*tensile strength*).



Gambar 3.1 ASTM D638 Type I

Pembuatan spesimen diawali dengan mengolah desain dan melakukan pengaturan setting di software yang digunakan yaitu software Ultimaker Cura 3.4.1, lalu melakukan 3D Printing menggunakan 3D Printer tipe Cartersian. Setelah produk jadi kemudian dilakukan uji kuat tarik pada spesimen hasil cetak 3D Printer tersebut sehingga didapat nilai kuat tarik sebagai acuan nilai kualitas awal produk sebelum dilakukan eksperimen penentuan nilai setting optimal.

Uji tarik sampel awal menggunakan 3 sampel specimen. Pada uji kuat tarik sampel awal, dilakukan uji tarik terhadap sampel specimen awal dan didapat nilai rata-rata beban maksimum sebesar 20 KgF, atau jika nilai tersebut dimasukkan dan dihitung menggunakan rumus kuat tarik didapatkan nilai kuat tarik rata-rata yaitu

sebesar 23,57 MPa. Nilai tersebut akan menjadi acuan terhadap nilai kuat tarik baru yang akan didapat setelah penelitian dilakukan nantinya. Gambar sampel spesimen awal dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Spesimen Awal

5. Perancangan Eksperimen

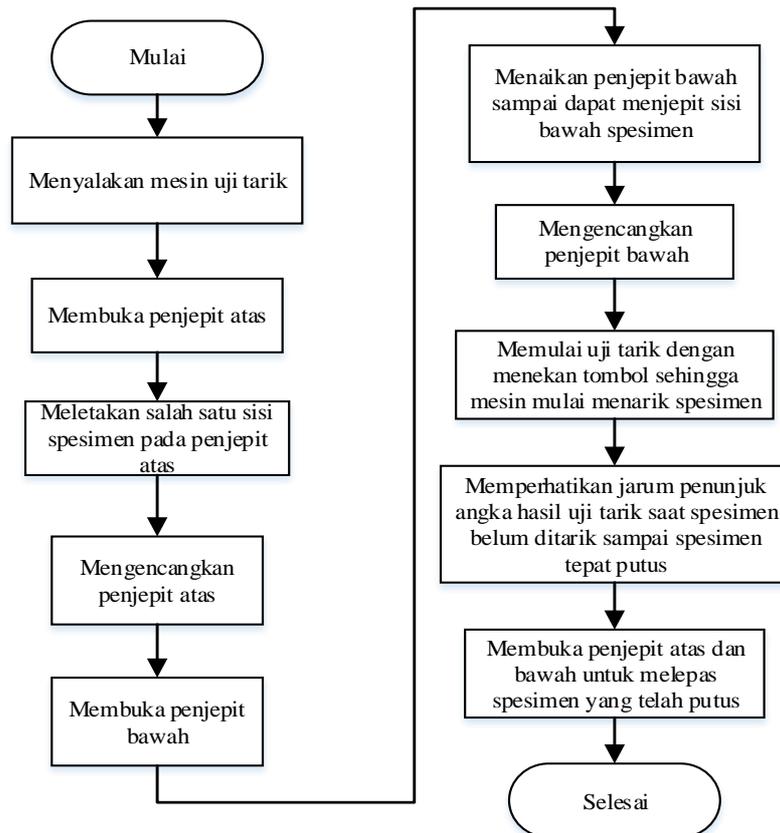
Perancangan eksperimen dimulai dengan menentukan faktor (jenis parameter setting) dan level serta menentukan jenis metode yang akan digunakan. Pada penelitian perancangan eksperimen ini terdapat 4 faktor yang akan diuji, yaitu suhu nozzle, layer thickness, suhu heatbed, dan infill pattern. Faktor-faktor ini masing-masing akan dibagi menjadi 3 level. Berikut merupakan rancangan awal yang akan diteliti menggunakan 3k factorial design.

Tabel 3.3 Keterangan Faktor Dan Level

A = Suhu Nozzle	B = Layer thickness
Level 1 = 190°C	Level 1 = 0,1 mm
Level 2 = 205°C	Level 2 = 0,2 mm
Level 3 = 220°C	Level 3 = 0,3 mm
C = Suhu Heatbed	D = Infill pattern
Level 1 = 40°C	Level 1 = Cubic
Level 2 = 50°C	Level 2 = Octet
Level 3 = 60°C	Level 3 = Quarter-Cubic

6. Pengumpulan Data Lanjutan

Pengumpulan data lanjutan dimulai dengan pembuatan spesimen sejumlah yang diperlukan, lalu dilakukan uji tarik terhadap spesimen-spesimen tersebut. Kemudian dilanjutkan dengan proses uji tarik yang diawali dengan proses penjepitan spesimen di kedua sisi kemudian membiarkan mesin menarik spesimen sampai putus sambil memperhatikan jarum penunjuk angka hasil uji kuat tarik yang muncul dalam satuan kilogram-force. Flowchart proses uji tarik dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Flowchart Proses Uji Tarik Spesimen

7. Pengolahan Data

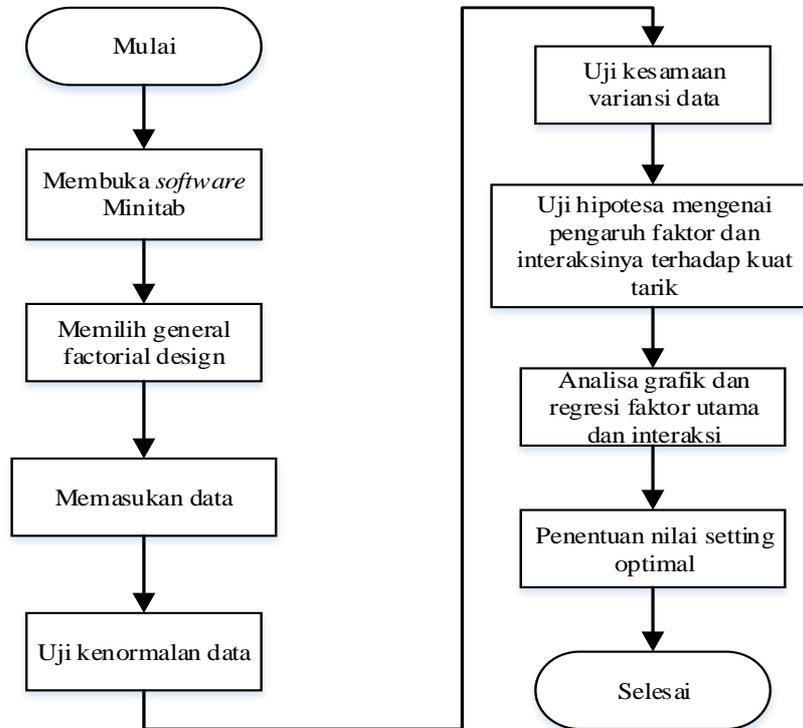
Flowchart proses pengolahan data dapat dilihat pada Gambar 3.4.

8. Validasi Data

Data yang telah didapat akan divalidasi kembali dengan mencetak dan menguji sampel dengan setting optimal yang didapat dari hasil perancangan eksperimen. Nilai tersebut akan dibandingkan dengan nilai hasil prediksi pada perancangan eksperimen melalui one sample t-test.

9. Penarikan Kesimpulan dan Saran

Setelah didapat nilai setting optimal, maka nilai kuat tarik yang dihasilkan dapat dibandingkan dengan nilai kualitas kuat tarik sampel spesimen awal.



Gambar 3.4. Flowchart Proses Pengolahan Data Hasil Uji Tarik

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengumpulan Data

Dengan *design* faktorial 3^4 dan 2 replikasi, maka didapatkan jumlah spesimen yang dibuat adalah sebanyak 162 spesimen. Spesimen dibuat dan di uji tarik sehingga didapatkan nilai beban maksimum yang dapat ditahan oleh masing-masing spesimen. Gambar spesimen setelah uji tarik dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Spesimen Setelah Uji Tarik

Kemudian data dirangkum dalam tabel hasil perancangan yang dapat dilihat pada Tabel 4.2. Data dijabarkan dalam satuan KgF, sehingga untuk menjadi nilai kuat tarik dengan satuan MPa diperlukan perhitungan membagi nilai beban maksimum dengan luas penampang patahan spesimen. Luas penampang patahan spesimen diasumsikan sama satu dengan yang lain, sehingga data yang digunakan untuk perancangan eksperimen adalah beban maksimum karena dianggap sebanding dengan nilai kuat tarik.

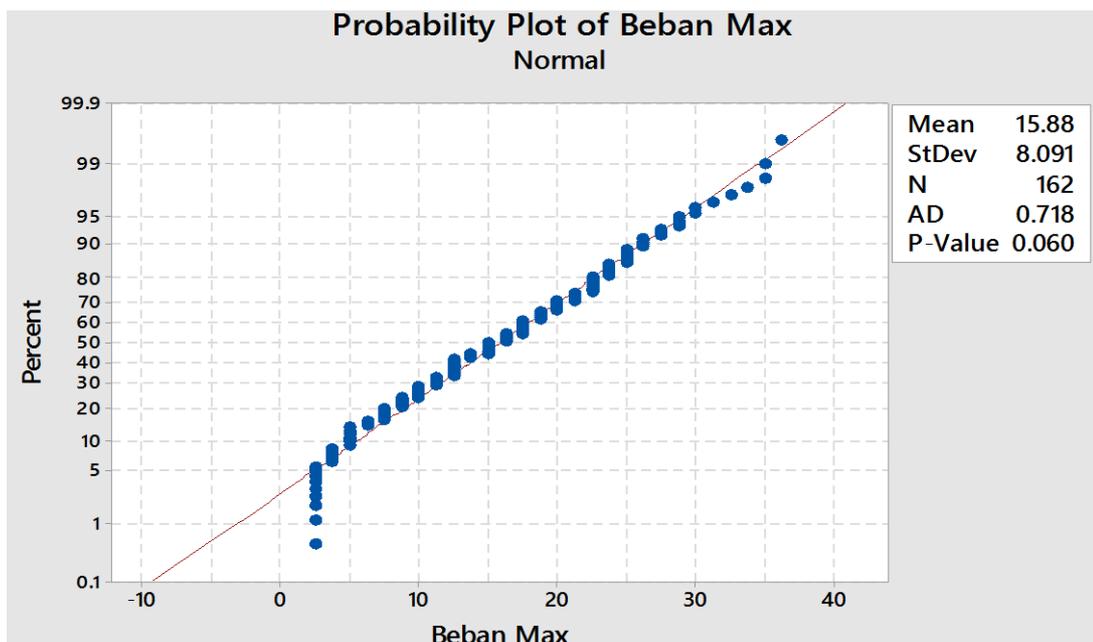
4.2. Pengolahan Data dan Analisis

Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah menggunakan *software*. Hasil uji kenormalan dan uji kesamaan variansi dapat dilihat pada Gambar 4.2. dan Gambar 4.3. Berdasarkan hasil uji kenormalan, dapat dilihat bahwa *p-value* yang didapatkan sebesar 0,060 yaitu lebih besar dari taraf signifikansi yang digunakan ($\alpha = 0,05$) sehingga dapat disimpulkan bahwa data terdistribusi normal. Hasil uji kesamaan variansi data juga menunjukkan bahwa *p-value* yang diperoleh sebesar 0,992 yaitu lebih

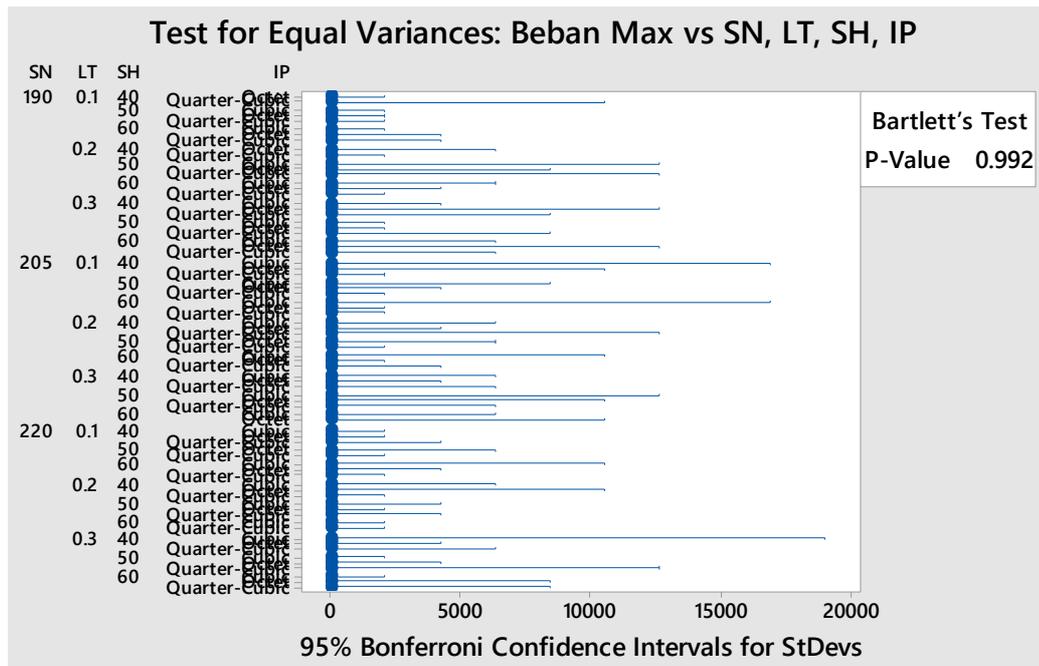
dari taraf signifikansi yang digunakan ($\alpha = 0,05$) sehingga dapat disimpulkan bahwa standar deviasi dari setiap kumpulan data tersebut sama atau data homogen.

Tabel 4.2. Tabel Data Hasil Uji Tarik (Beban Maksimum Dalam Satuan KgF)

Suhu Heatbed (SH)	Infill Pattern (IP)	Suhu Nozzle (SN)								
		SN1			SN2			SN3		
		Layer Thickness (LT)								
		LT1	LT2	LT3	LT1	LT2	LT3	LT1	LT2	LT3
SH1	IP1	22,5	12,5	7,5	26,25	26,25	21,25	33,75	18,75	35
		22,5	12,5	5	36,25	22,5	25	32,5	22,5	23,75
	IP2	21,25	7,5	10	22,5	15	2,5	27,5	18,75	15
		20	11,25	2,5	16,25	12,5	5	28,75	12,5	17,5
	IP3	23,75	3,75	2,5	23,75	10	7,5	27,5	16,25	15
		17,5	5	7,5	22,5	17,5	3,75	30	17,5	11,25
SH2	IP1	21,25	2,5	3,75	28,75	16,25	11,25	22,5	15	3,75
		20	10	2,5	23,75	16,25	3,75	22,5	17,5	5
	IP2	16,25	12,5	7,5	27,5	2,5	2,5	26,25	15	8,75
		17,5	17,5	6,25	25	6,25	8,75	30	13,75	11,25
	IP3	18,75	5	2,5	18,75	16,25	13,75	26,25	12,5	20
		17,5	12,5	7,5	20	17,5	10	25	15	12,5
SH3	IP1	23,75	12,5	11,25	31,25	11,25	8,75	35	18,75	12,5
		25	8,75	7,5	21,25	17,5	12,5	28,75	17,5	13,75
	IP2	20	12,5	2,5	23,75	5	15	25	21,25	15
		22,5	15	10	25	6,25	8,75	22,5	21,25	20
	IP3	13,75	11,25	5	20	12,5	10	23,75	20	5
		16,25	12,5	8,75	18,75	15	10	25	18,75	10



Gambar 4.2 Grafik Uji Kenormalan Data



Gambar 4.3 Hasil Uji Kesamaan Variansi

Selanjutnya data diuji menggunakan metode desain faktorial untuk menentukan besarnya pengaruh dari setiap faktor yang diteliti terhadap hasil percobaan (beban maksimum/kuat tarik). Perumusan untuk setiap faktor yang akan dianalisa adalah sebagai berikut:

H_{01} = Faktor *setting* suhu *nozzle* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{11} = Faktor *setting* suhu *nozzle* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{02} = Faktor *setting layer thickness* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{12} = Faktor *setting layer thickness* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{03} = Faktor *setting* suhu *heatbed* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{13} = Faktor *setting* suhu *heatbed* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{04} = Faktor *setting infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

- H_{14} = Faktor *setting infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{05} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle* dan *layer thickness* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{15} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle* dan *layer thickness* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{06} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle* dan suhu *heatbed* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{16} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle* dan suhu *heatbed* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{07} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle* dan *infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{17} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle* dan *infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{08} = Interaksi faktor *setting layer thickness* dan suhu *heatbed* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{18} = Interaksi faktor *setting layer thickness* dan suhu *heatbed* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{09} = Interaksi faktor *setting layer thickness* dan *infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{19} = Interaksi faktor *setting layer thickness* dan *infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{010} = Interaksi faktor *setting suhu heatbed* dan *infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{110} = Interaksi faktor *setting suhu heatbed* dan *infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{011} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle, layer thickness, dan suhu heatbed* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{111} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle, layer thickness, dan suhu heatbed* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{012} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle, layer thickness, dan infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;
- H_{112} = Interaksi faktor *setting suhu nozzle, layer thickness, dan infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{013} = Interaksi faktor *setting* suhu *nozzle*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{113} = Interaksi faktor *setting* suhu *nozzle*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{014} = Interaksi faktor *setting layer thickness*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{114} = Interaksi faktor *setting layer thickness*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{015} = Interaksi faktor *setting* suhu *nozzle*, *layer thickness*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk;

H_{115} = Interaksi faktor *setting* suhu *nozzle*, *layer thickness*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tarik produk.

Selanjutnya akan dilakukan uji ANOVA untuk menguji kebenaran dari masing-masing hipotesis yang telah dibuat. Hasil uji ANOVA dapat dilihat pada Tabel 4.3. Dari hasil uji ANOVA, dapat dilihat untuk faktor tunggal, seluruh faktor memiliki nilai *p-value* yang lebih kecil dari 0,05 sehingga didapat kesimpulan untuk menolak H_{01} , H_{02} , H_{03} , dan H_{04} . Maka dapat disimpulkan bahwa seluruh faktor utama berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tarik produk.

Pada faktor interaksi 2 arah, dapat dilihat bahwa interaksi faktor suhu *nozzle* dengan *layer thickness*, interaksi faktor *layer thickness* dengan suhu *heatbed*, dan interaksi faktor *layer thickness* dengan *infill pattern* memiliki nilai *p-value* yang lebih besar dari 0,05 sedangkan ketiga jenis interaksi faktor lainnya memiliki nilai *p-value* lebih kecil dari 0,05 sehingga didapat kesimpulan untuk menerima H_{05} , H_{08} , dan H_{09} , lalu menolak H_{06} , H_{07} , dan H_{010} . Maka dapat disimpulkan bahwa dari keenam jenis interaksi faktor 2 arah, terdapat 3 jenis interaksi yang berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tarik produk, yaitu jenis interaksi faktor suhu *nozzle* dan suhu *heatbed*, interaksi faktor suhu *nozzle* dan *infill pattern*, dan interaksi faktor suhu *heatbed* dan *infill pattern*.

Pada faktor interaksi 3 arah dapat dilihat bahwa hampir seluruh interaksi faktor memiliki nilai *p-value* yang lebih kecil dari 0,05, kecuali interaksi faktor suhu *nozzle*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern*, sehingga didapat kesimpulan untuk menolak H_{011} , H_{012} , dan H_{014} , sekaligus menerima H_{013} . Maka dapat disimpulkan bahwa seluruh jenis interaksi faktor 3 arah berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tarik produk,

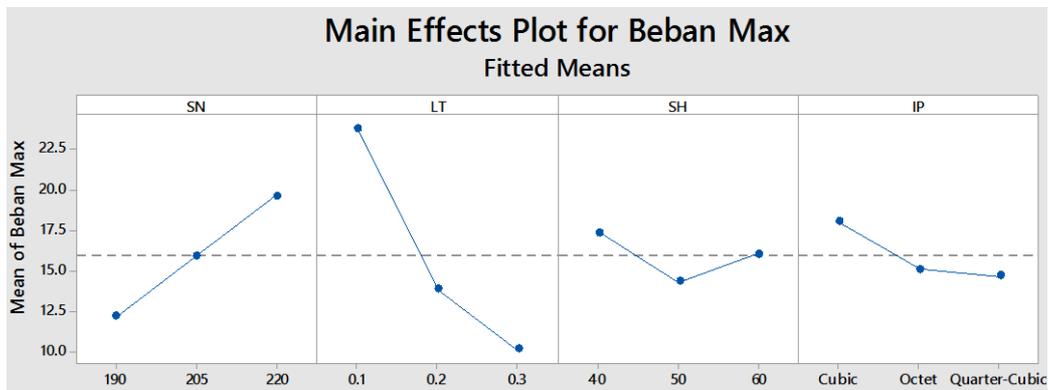
terkecuali interaksi 3 arah faktor suhu *nozzle*, suhu *heatbed*, dan *infill pattern* yang memiliki *p-value* lebih besar dari 0,05.

Tabel 4.3 Hasil Uji ANOVA

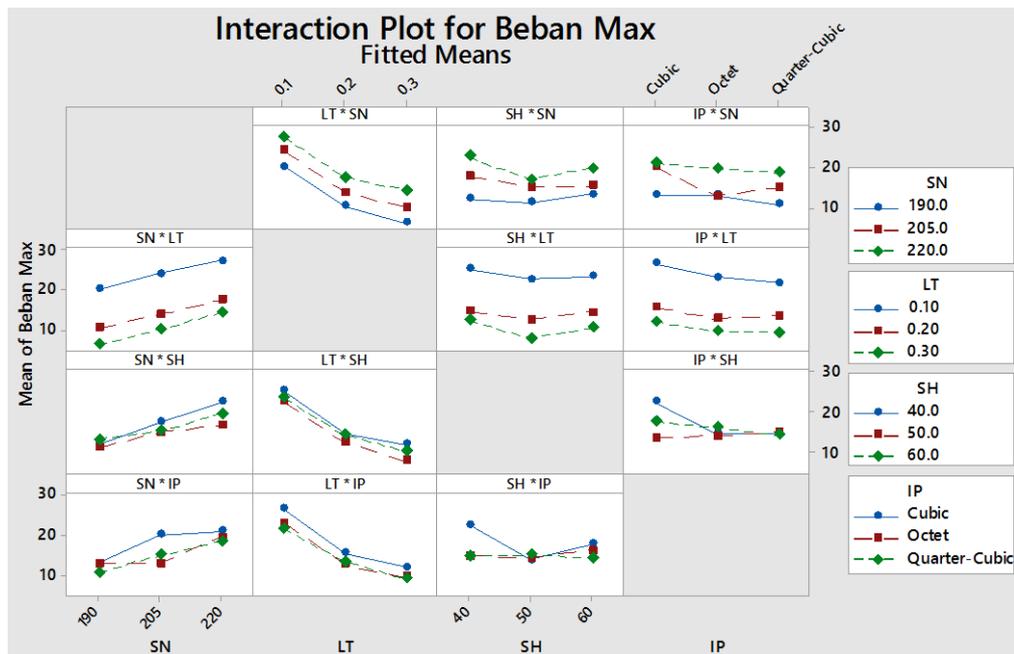
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Jenis Hipotesa	Keterangan
Model	80	9813.7	122.67	13.68	0.0000		
Linear	8	7533.7	941.72	104.99	0.0000		
SN	2	1518.7	759.37	84.66	0.0000	H_{01}	Tolak
						H_{11}	Terima
LT	2	5412.7	2706.34	301.71	0.0000	H_{02}	Tolak
						H_{12}	Terima
SH	2	246.1	123.03	13.72	0.0000	H_{03}	Tolak
						H_{13}	Terima
IP	2	356.2	178.12	19.86	0.0000	H_{04}	Tolak
						H_{14}	Terima
2-Way Interactions	24	1015.5	42.31	4.72	0.0000		
SN*LT	4	5.9	1.48	0.16	0.9558	H_{05}	Terima
						H_{15}	Tolak
SN*SH	4	156.2	39.05	4.35	0.0031	H_{06}	Tolak
						H_{16}	Terima
SN*IP	4	266.0	66.49	7.41	0.0000	H_{07}	Tolak
						H_{17}	Terima
LT*SH	4	32.9	8.23	0.92	0.4578	H_{08}	Terima
						H_{18}	Tolak
LT*IP	4	42.0	10.50	1.17	0.3298	H_{09}	Terima
						H_{19}	Tolak
SH*IP	4	512.4	128.11	14.28	0.0000	H_{010}	Tolak
						H_{110}	Terima
3-Way Interactions	32	836.8	26.15	2.92	0.0001		
SN*LT*SH	8	212.6	26.57	2.96	0.0059	H_{011}	Tolak
						H_{111}	Terima
SN*LT*IP	8	175.2	21.90	2.44	0.0203	H_{012}	Tolak
						H_{112}	Terima
SN*SH*IP	8	140.3	17.54	1.96	0.0627	H_{013}	Terima
						H_{113}	Tolak
LT*SH*IP	8	308.7	38.59	4.30	0.0002	H_{014}	Tolak
						H_{114}	Terima
4-Way Interactions	16	427.7	26.73	2.98	0.0006		
SN*LT*SH*IP	16	427.7	26.73	2.98	0.0006	H_{015}	Tolak
						H_{115}	Terima
Error	81	726.6	8.97				
Total	161	10540.3					
S = 2.995 R-sq = 93.11% R-sq(adj) = 86.30% R-sq(pred) = 72.43%							

Pada faktor interaksi 4 arah dapat dilihat memiliki nilai *p-value* lebih kecil dari 0,05 sehingga didapat kesimpulan untuk menolak H_{015} . Maka dapat disimpulkan bahwa satu-satunya jenis interaksi faktor 4 arah berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tarik produk. Untuk dapat melihat signifikansi efek dari setiap faktor yang dianalisis, maka dibuat grafik yang menunjukkan rata-rata efek dari setiap faktor

utama dan faktor interaksi. Grafik efek faktor utama dan grafik efek faktor interaksi dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Efek Faktor Utama



Gambar 4.5 Efek Faktor Interaksi

Pada gambar efek faktor utama, dapat dilihat grafik pengaruh faktor utama secara tunggal berdasarkan nilai rata-rata. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa efek dari faktor suhu *nozzle* cenderung naik (semakin tinggi nilai suhu *nozzle* maka semakin baik nilai kuat tarik), efek dari faktor *layer thickness* cenderung turun (semakin kecil nilai *layer thickness* maka semakin baik nilai kuat tarik), efek dari suhu *heatbed* cenderung turun pada level 2 dan selanjutnya naik pada level 3, dan efek dari *infill pattern* yang cenderung turun.

Hasil dari efek faktor utama ini tidak dapat langsung diinterpretasikan sebagai nilai *setting* optimal, karena ada efek interaksi faktor yang harus dipertimbangkan. Pada grafik faktor interaksi, dapat dilihat beberapa faktor memiliki garis yang saling memotong dan bersinggungan. Hal ini menunjukkan bahwa beberapa faktor mempengaruhi satu sama lain secara signifikan, faktor-faktor yang berinteraksi ini sesuai dengan hasil uji ANOVA pengujian interaksi faktor 2 arah, yaitu suhu *nozzle* dengan suhu *heatbed*, suhu *nozzle* dengan *infill pattern*, dan suhu *heatbed* dengan *infill pattern*.

Layer thickness memberi pengaruh paling signifikan pada grafik efek faktor utama, namun pada grafik faktor interaksi dapat dilihat bahwa *layer thickness* tidak dipengaruhi oleh faktor lain sehingga masing-masing garisnya cenderung sejajar satu sama lain.

Pada grafik interaksi suhu *heatbed* dan *infill pattern* “SH*IP” dapat dilihat bahwa pada suhu *heatbed* 40°C, *infill pattern* jenis *cubic* memberi nilai kuat tarik paling tinggi, namun ketika suhu *heatbed* naik menjadi 50°C dan 60°C, seluruh *infill pattern* memberi nilai kuat tarik yang hampir sama satu sama lain.

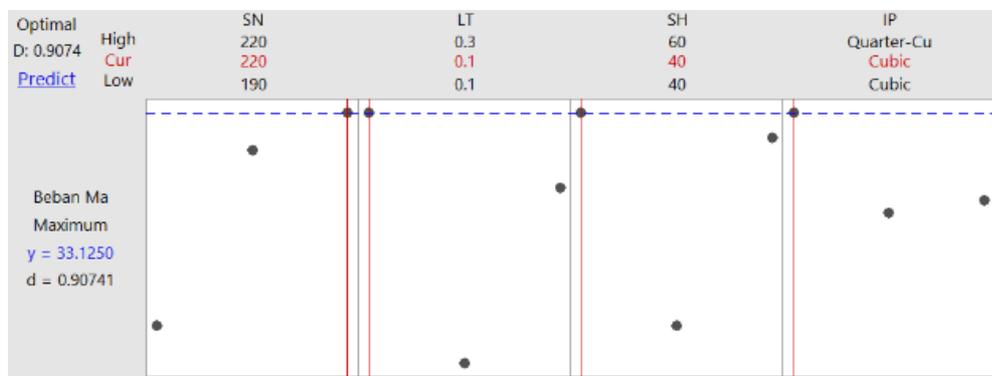
Pada grafik interaksi suhu *heatbed* dan suhu *nozzle* “SH*SN” dapat dilihat bahwa garis suhu *nozzle* 220°C (garis hijau) selalu berada di paling atas, hal ini menunjukkan bahwa pada interaksi suhu *nozzle* dan suhu *heatbed* tidak terdapat interaksi yang cukup ekstrim, sehingga suhu *nozzle* 220°C tetap memberikan nilai kuat tarik tertinggi berapapun nilai suhu *heatbed*-nya. Walaupun pada interaksi antara suhu *nozzle* dan suhu *heatbed* tidak terlihat garis yang berpotongan, namun dapat dilihat titik yang berdekatan.. Hal ini menunjukkan bahwa suhu *nozzle* senilai 205°C dan 220°C memberikan efek nilai kuat tarik yang hampir sama jika dipadukan dengan suhu *heatbed* senilai 50°C, begitu juga dengan efek nilai kuat tarik dari suhu *nozzle* 190°C dan 205°C jika dipadukan dengan suhu *heatbed* pada senilai 60°C.

Pada grafik interaksi suhu *nozzle* dan *infill pattern* “SN*IP” dapat dilihat bahwa garis *infill pattern* (garis biru) jenis *cubic* berada dipaling atas, walaupun pada suhu *nozzle* 190°C dan 220°C, *infill pattern* jenis lain memberi nilai yang hampir sama dengan *infill pattern* jenis *cubic* (titik berdekatan). *Infill pattern* jenis *cubic* dan *quarter-cubic* meningkatkan kuat tarik pada suhu *nozzle* 205°C, hal ini berbeda dengan *infill pattern* jenis *octet* yang justru menurunkan kuat tarik pada suhu *nozzle* 205°C, namun kembali naik pada suhu *nozzle* 220°C. Pada grafik “IP*SN” juga dapat dilihat

bahwa suhu *nozzle* 220°C (garis hijau) selalu memberikan nilai kuat tarik paling tinggi dibanding dengan suhu *nozzle* dengan level dibawahnya.

4.3. Optimisasi Dengan *Factorial Design*

Nilai *setting* optimal didapat dari *response optimizer* pada *software* minitab, lalu didapat nilai *setting* optimal suhu *nozzle* 220°C, *layer thickness* 0,1 mm, suhu *heatbed* 40°C, dan *infill pattern* dengan jenis *cubic*. Dari *setting* optimal tersebut, didapat kualitas produk hasil cetak 3D yang lebih baik dari uji sampel awal yaitu produk dapat menahan beban maksimum sebesar 33,125 KgF atau setara dengan nilai kuat tarik sebesar 39,04 MPa. Plot optimisasi dapat dilihat pada Gambar 4.6



Gambar 4.6. Plot Optimisasi *Factorial Design*

Nilai optimal yang disebutkan merupakan hasil rata-rata dari data hasil uji tarik terhadap 162 spesimen yang telah dilakukan, namun untuk menggambarkan efek dari faktor utama maupun faktor interaksi terhadap kuat tarik, maka perlu diketahui persamaan regresi untuk dapat mewakili efek dari nilai faktor yang ada. Maka dilakukan *fit regression model*, sehingga didapat koefisien yang dapat dilihat pada tabel 4.4.

Persamaan regresi dibagi menjadi 3, hal ini dikarenakan *infill pattern* merupakan *categorical factor*, sehingga persamaan regresi dibagi menjadi 3 jenis sesuai dengan level *infill pattern*. Jika pada persamaan tersebut dimasukan nilai *setting* optimal yang didapat [220°C, 0,1 mm, 40°C, *Cubic*], maka:

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Max} &= -97,8 + 0,603*220 - 71,0*0,1 - 1,545*40 + 0,00688*220*40 - \\
 &\quad 0,0077*220*0,1*40 - 0,455*220*0,1 + 0,33*0,1*40 \\
 &= 30,93 \text{ KgF}
 \end{aligned}$$

Dari hasil persamaan regresi didapat nilai 30,93 KgF. Nilai tersebut berbeda dengan nilai hasil prediksi yang terdapat di plot optimisasi yaitu 33,125 KgF, hal ini dikarenakan persamaan regresi didapat dari garis linear yang posisinya mendekati titik-titik sebaran data, sehingga pada titik optimal garis regresi didapat nilai yang hanya mendekati titik sebaran data namun belum tentu menyentuh titik sebaran data, sedangkan nilai prediksi pada plot optimisasi berdasarkan dari sebaran data. Dari koefisien tersebut didapat persamaan regresi yang dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.4 Koefisien *Regression Model Factorial Design*

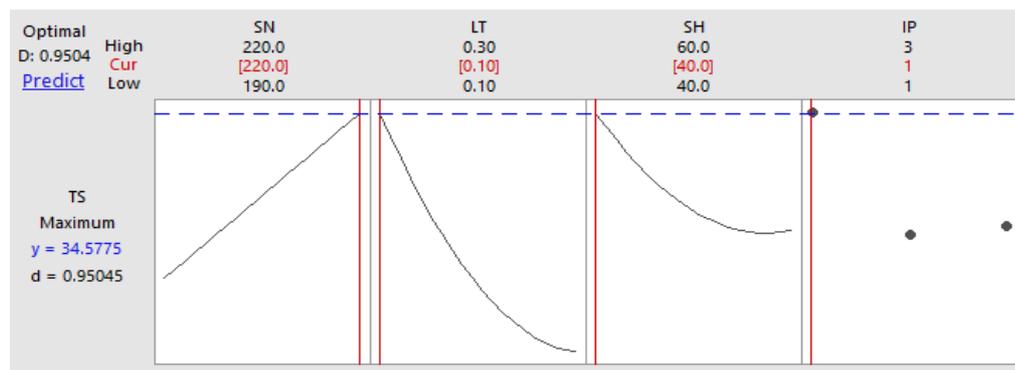
<i>Coefficients</i>				
<i>Term</i>	<i>Coef</i>	<i>SE Coef</i>	<i>T-Value</i>	<i>P-Value</i>
Constant	-87.9	38.3	-2.29	0.023
SN	0.591	0.185	3.20	0.002
LT	-71.0	26.1	-2.73	0.007
SH	1335	0.750	1.78	0.077
IP				
Cubic	-9.9	22.5	-0.44	0.662
Octet	20.2	22.5	0.90	0.371
Quarter-Cubic	-10.3	22.5	-0.46	0.647
SN*SH	-0.00688	0.00368	-1.87	0.064
SN*IP				
Cubic	0.012	0.104	0.11	0.911
Octet	-0.096	0.104	-0.92	0.357
Quarter-Cubic	0.085	0.104	0.81	0.417
SH*IP				
Cubic	0.210	0.166	1.27	0.208
Octet	-0.023	0.166	-0.14	0.891
Quarter-Cubic	-0.187	0.166	-1.13	0.261
SN*LT*SH	0.00026	0.00250	0.10	0.918
SN*LT*IP				
Cubic	0.455	0.189	2.40	0.018
Octet	-0.196	0.189	-1.03	0.303
Quarter-Cubic	-0.259	0.189	-1.37	0.174
LT*SH*IP				
Cubic	-0.33	1.95	-0.17	0.866
Octet	-1.32	1.95	-0.68	0.499
Quarter-Cubic	1.65	1.95	0.85	0.398
SN*LT*SH*IP				
Cubic	-0.0079	0.0100	-0.79	0.429
Octet	0.0103	0.0100	1.03	0.306
Quarter-Cubic	-0.0023	0.0100	-0.23	0.815

Tabel 4.5 Persamaan Regresi *Factorial Design*

<i>Infill Pattern (IP)</i>	<i>Regression Equation</i>
<i>Cubic</i>	Beban Max = $-97.8 + 0.603 \text{ SN} - 71.0 \text{ LT} + 1.545 \text{ SH} - 0.00688 \text{ SN*SH} - 0.0077 \text{ SN*LT*SH} + 0.455 \text{ SN*LT} - 0.33 \text{ LT*SH}$
<i>Octet</i>	Beban Max = $-67.7 + 0.495 \text{ SN} - 71.0 \text{ LT} + 1.312 \text{ SH} - 0.00688 \text{ SN*SH} + 0.0105 \text{ SN*LT*SH} - 0.196 \text{ SN*LT} - 1.32 \text{ LT*SH}$
<i>Quarter-Cubic</i>	Beban Max = $-98.2 + 0.676 \text{ SN} - 71.0 \text{ LT} + 1.148 \text{ SH} - 0.00688 \text{ SN*SH} - 0.0021 \text{ SN*LT*SH} - 0.259 \text{ SN*LT} + 1.65 \text{ LT*SH}$

4.4. Optimisasi Dengan *Response Surface Method*

Setelah mendapat nilai *setting* optimal dari *factorial design*, dilakukan perbandingan dengan hasil yang didapat dari *response surface method*. Pada *response surface method* didapat hasil berupa garis parabola sehingga nilai optimal bisa jadi berbeda dari hasil *factorial design*. Plot optimisasi *response surface method* dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Plot Optimisasi *Response Surface Method*

Dari plot optimisasi diatas dapat dilihat bahwa nilai *setting* optimal yang didapat sama dengan plot optimisasi *factorial design*, yaitu suhu *nozzle* 220°C, *layer thickness* 0,1 mm, suhu *heatbed* 40°C, dan *infill pattern* dengan jenis *cubic* (yang diwakili oleh angka 1). Nilai kuat tarik yang diprediksi dari nilai *setting* optimal tersebut adalah 34,5775 KgF atau setara dengan 40,76 MPa. Nilai kuat tarik yang diprediksi berbeda dengan nilai prediksi pada plot optimisasi *factorial design* (33,125 KgF), walaupun nilai *setting* optimal yang didapat sama (220°C, 0,1 mm, 40°C, *Cubic*).

Nilai *setting* optimal yang didapat sama karena pada plot optimisasi *factorial design* tidak terlihat ada faktor yang menghasilkan nilai kuat tarik tinggi pada level tengah, sehingga pada plot optimisasi *response surface method* tidak terdapat kurva yang terlihat terbuka kebawah, sedangkan nilai kuat tarik akan di targetkan untuk semaksimal mungkin, sehingga nilai optimal akan berada pada nilai level atas/bawah dan didapat nilai optimal yang sama seperti plot optimisasi *factorial design*.

Tabel 4.6 Koefisien *Regression Model Response Surface Method*

<i>Coded Coefficients</i>				
<i>Term</i>	<i>Coef</i>	<i>SE Coef</i>	<i>T-Value</i>	<i>P-Value</i>
Constant	12.199	0.901	13.54	0.000
SN	3.750	0.417	8.99	0.000
LT	-6.840	0.417	-16.41	0.000
SH	-0.648	0.417	-1.55	0.122
IP				
1	2.083	0.481	4.33	0.000
2	-0.833	0.481	-1.73	0.086
3	-1.250	0.481	-2.60	0.010
SN*SN	-0.000	0.722	-0.00	1.000
LT*LT	3.160	0.722	4.38	0.000
SH*SH	2.361	0.722	3.27	0.001
SN*LT	0.174	0.511	0.34	0.734
SN*SH	-1.024	0.511	-2.01	0.047
SN*IP				
1	0.347	0.590	0.59	0.557
2	-0.486	0.590	-0.82	0.411
3	0.139	0.590	0.24	0.814
LT*SH	0.035	0.511	0.07	0.946
LT*IP				
1	-0.486	0.590	-0.82	0.411
2	-0.069	0.590	-0.12	0.906
3	0.556	0.590	0.94	0.348
SH*IP				
1	-1.817	0.590	-3.08	0.002
2	1.343	0.590	2.28	0.024
3	0.475	0.590	0.80	0.422

Tabel 4.7. Persamaan Regresi *Response Surface Method*

<i>Infill Pattern</i>	<i>Regression Equation in Uncoded Units</i>
1	Beban Max = -8 + 0.59 SN - 225.1 LT - 1.21 SH - 0.00000 SN*SN + 316.0 LT*LT + 0.02361 SH*SH + 0.116 SN*LT - 0.00683 SN*SH + 0.035 LT*SH
2	Beban Max = -16 + 0.54 SN - 220.9 LT - 0.90 SH - 0.00000 SN*SN + 316.0 LT*LT + 0.02361 SH*SH + 0.116 SN*LT - 0.00683 SN*SH + 0.035 LT*SH
3	Beban Max = -22 + 0.58 SN - 214.7 LT - 0.99 SH - 0.00000 SN*SN + 316.0 LT*LT + 0.02361 SH*SH + 0.116 SN*LT - 0.00683 SN*SH + 0.035 LT*SH

4.5. Validasi Hasil

Nilai *setting* optimal yang didapat perlu divalidasi kembali dengan replikasi yang lebih banyak, sehingga dilakukan pencetakan 3D sampel uji dengan nilai *setting* optimal yang didapat [220°C, 0,1 mm, 40°C, *Cubic*], lalu diuji tarik kembali. Validasi dilakukan dengan replikasi sebanyak 3 kali dan didapat nilai 31,25 KgF, 33,75 KgF, dan 31,25 KgF.

Nilai tersebut diolah menggunakan analisis *one sample t-test* untuk diketahui signifikansi perbedaannya terhadap nilai kuat tarik hasil prediksi *factorial design* dan *response surface method* yang didapat. Hasil analisis one sample t-test terhadap nilai kuat tarik hasil prediksi *factorial design* dan *response surface method* dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Hasil Uji *One Sample t-test* Nilai Validasi Terhadap Nilai Prediksi *Factorial Design*

<i>Null hypothesis</i>	$H_0: \mu = 33.125$
<i>Alternative hypothesis</i>	$H_1: \mu \neq 33.125$
<i>T-Value</i>	<i>P-Value</i>
-1.25	0.338

Tabel 4.9 Hasil Uji *One Sample t-test* Nilai Validasi Terhadap Nilai Prediksi *Response Surface Method*

<i>Null hypothesis</i>	$H_0: \mu = 34.5775$
<i>Alternative hypothesis</i>	$H_1: \mu \neq 34.5775$
<i>T-Value</i>	<i>P-Value</i>
-2.99	0.096

Dari Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa keduanya menunjukkan *p-value* yang lebih besar dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa *null hypothesis* (H_0) diterima, maka dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara nilai beban maksimum hasil validasi dengan nilai beban maksimum hasil prediksi *factorial design* maupun hasil prediksi *response surface method* yang telah didapat sebelumnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan adalah:

- a. Seluruh faktor utama yang diuji (suhu *nozzle*, *layer thickness*, suhu *heatbed*, *infill pattern*) berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik produk hasil cetak 3D Printer.
- b. Sebagian faktor interaksi 2 arah juga berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kuat tarik, yaitu suhu *nozzle* dengan suhu *heatbed*, suhu *nozzle* dengan *infill pattern*, dan suhu *heatbed* dengan *infill pattern*. *Layer thickness* tidak memiliki interaksi 2 arah dengan faktor apapun, sehingga *layer thickness* dapat diganti sesuai dengan keperluan tanpa harus mengganti nilai *setting*/faktor lainnya.
- c. Nilai *setting* optimal yang didapat adalah suhu *nozzle* senilai 220°C, *layer thickness* senilai 0,1 mm, suhu *heatbed* senilai 40°C, dan *infill pattern* berjenis *cubic*.
- d. Nilai beban maksimum kuat tarik berdasarkan hasil prediksi *factorial design* (sesuai rata-rata data) sebesar 33,125 KgF (39,04 MPa), berdasarkan hasil prediksi *response surface method* sebesar 34,5775 KgF (40,76 MPa), dan berdasarkan rata-rata hasil validasi yaitu 32,083 KgF (37,82 MPa). Seluruh nilai tersebut lebih baik jika dibanding dengan kualitas sampel awal yang dicetak menggunakan nilai *setting* bawaan *software*.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat penulis sampaikan pada penelitian ini yaitu:

- a. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan melakukan pengujian terhadap kombinasi faktor-faktor *setting* lainnya dengan level uji yang diperbanyak agar memperjelas *trendline* dari setiap faktor yang diuji, pengujian juga dapat dilakukan menggunakan faktor diluar *setting* (misalnya jenis bahan filamen, merk filamen, dan jenis 3D Printer).
- b. Pada penelitian selanjutnya, hasil yang didapat bisa berupa kekuatan tekan (*flexural strength*), galat dimensi, ataupun berupa biaya optimal (dapat memperhitungkan depresiasi mesin dan biaya *maintenance*).
- c. Pada penelitian ini menggunakan filamen dengan diameter 1,75 mm. untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan filamen dengan jenis diameter 2,85 mm, karena memungkinkan untuk didapatkan hasil yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Avella, M., Buzarovska, A., Errico, M. E., Gentile, G., and Grozdanov, A. Eco-Challenges of Bio-Based Polymer Composites. *Materials*, 2 (2009): 911-925.
- Aziz, A.A.B.A. A Feasibility Study of 3D Printer Parameters Optimization By Using Bamboo Powders. *Tesis*, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Malaysia. 2011.
- Durgun, I., and Ertan R. Experimental Investigation of FDM Process for Improvement of Mechanical Properties and Production Cost. *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 20. No.3 (2014): 228-235.
- Ebrahimnejad, P., Dinarvand, R., Sajadi, S. A., Atyabi, F., Ramezani, F., and Jaafari, R. Preparation And Characterization of Poly Actide-Co-Glycolide Nanoparticles of SN-38. *Journal of Pharmaceutical Science and Technology*. Vol.63. No.6 (2009): 512-520.
- Montgomery, Douglas C. 2013. *Design and Analysis of Experiments*. 8th Edition. New York: John Wiley.
- Salomon, L.L. Kosasih, W. Angkasa, S.O. 2015. Perancangan Eksperimen untuk Meningkatkan Kualitas Ketangguhan Material dengan Pendekatan Analisis General Factorial Design (Studi Kasus: Produk Solid Surface). *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*. Vol 4, No 1. 2015.
- Suryani dan Hendryadi. 2015. *Metode Riset Kuantitatif. Teori dan Aplikasi Pada Penelitian Bidang Manajemen dan Ekonomi Islam*. Jakarta : Prenadamedia Group.
- Tontowi, A.E. *Produk Inovatif: Desain Konsep, Prototype, dan HKI (Desain Industri-Paten)*. Yogyakarta: Deepublish. 2013.
- Yuwono, S. D. dan Widiarto, S. 2010. Batch and Continuous Direct Lactic Acid Fermentation from Cassava by *Streptococcus Bovis*. Seminar Nasional MIPA Unila 2010.