

## BAB IV

### HASIL DAN ANALISIS PENELITIAN

#### 4.1. Hasil Penelitian

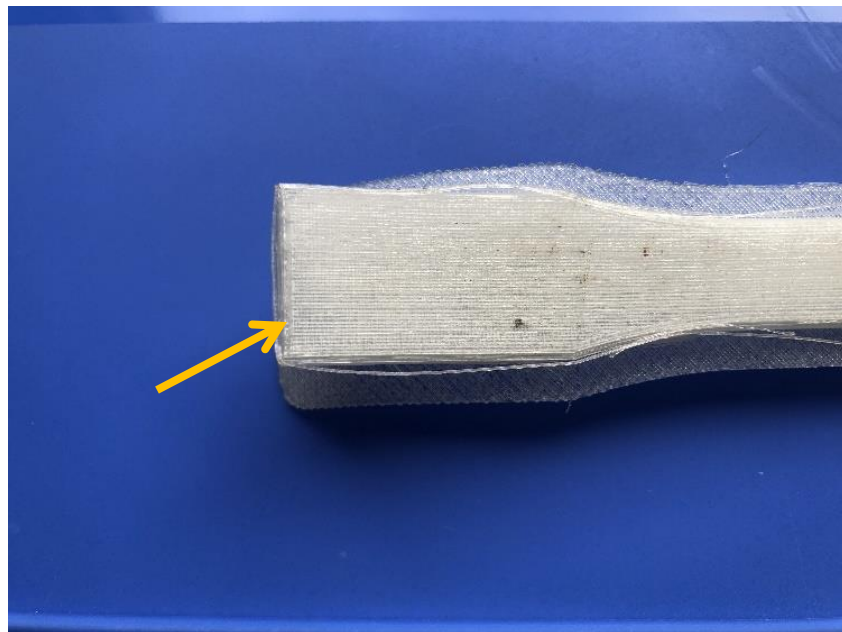
Hasil penelitian ini yang telah dilakukan menghasilkan 27 spesimen menggunakan standar ASTM D638-01 dari 9 percobaan dengan tiga kali pengulangan. Setiap pembuatan spesimen menggunakan 3D *printer* gateform-C02. Kemudian, setelah spesimen dibuat, dilakukan pengukuran data pada setiap spesimen meliputi massa produk, dimensi produk, waktu proses pencetakan, dan pengujian Tarik. Tabel desain faktorial ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan spesimen hasil 3D *printing* ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Tabel 4.1. Desain faktorial Penelitian

Percobaan	Parameter proses		
	<i>Nozzle Temperature</i> (°C)	<i>Infill Density</i> (%)	<i>Layer Thickness</i> (mm)
1	240	50	0.1
2	240	60	0.2
3	240	70	0.25
4	245	50	0.2
5	245	60	0.25
6	245	70	0.1
7	250	50	0.25
8	250	60	0.1
9	250	70	0.2



Gambar 4.1. Sampel spesimen produk 3D *printing*



Gambar 4.2. Celah atau *gap* hasil ekstrusi

Berdasarkan Gambar 4.2. diatas menunjukkan hasil ikatan lapisan produk 3D *printing* yang kurang baik. Terdapat celah atau *gap* yang cukup besar antara *layer* dengan *perimeter* (tiga dinding terluar). Hal ini dapat terjadi karena temperatur pencetakan yaitu meliputi temperatur *nozzle* dan temperatur *bed* yang terlalu rendah. Temperatur pencetakan pada proses 3D *printing* merupakan parameter proses yang sangat penting karena memiliki pengaruh yang signifikan terhadap

pembentukan ikatan lapisan cetakan dan untuk mengatur temperatur awal bahan yang akan diendapkan. Filament yang diekstrusi adalah sebagai bahan yang diendapkan, kemudian menjadi dingin, mengeras, dan mengikat dengan ekstrusi disekitarnya yang terlebih dahulu terekstrusi. Jadi untuk kasus ini dapat diambil kesimpulan bahwa pengaturan temperature pencetakan yang rendah akan menyebabkan terjadinya celah di antara *layer* dan *perimeter*. Sehingga perlu dilakukan *setting* temperatur pencetakan yang lebih tinggi guna untuk memperkuat ikatan antar ekstrusi dan untuk meminimalisir terjadinya pembentukan celah.

#### 4.1.1. Massa Produk dan Waktu Pencetakan

Berdasarkan hasil penimbangan dan pencatatan waktu pencetakan didapat data nilai rata-rata massa produk dan waktu pencetakan dari 27 spesimen. Pada table rata-rata massa, tiga urutan nilai tertinggi dihasilkan pada percobaan ke 3,6, dan 9. Sedangkan tiga urutan waktu pencetakan paling lama terdapat pada percobaan ke 1, 6, dan 8. Table rata-rata massa dan waktu pencetakan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

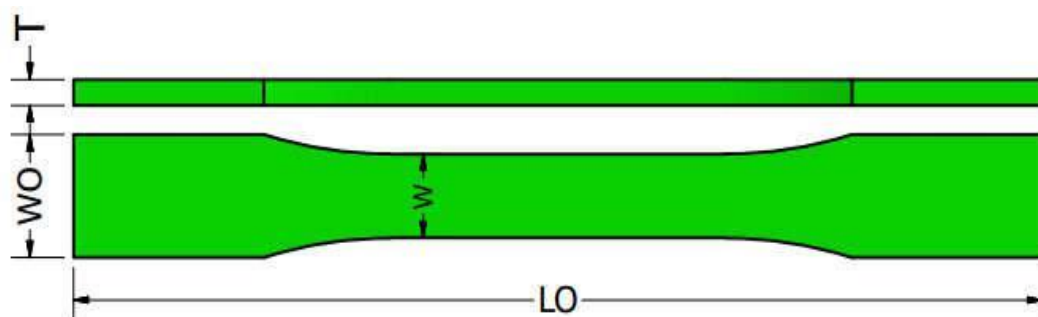
Tabel 4.2. Rata-rata massa dan waktu pencetakan

Percobaan	Massa (gram)				Waktu pencetakan (menit)
	R1	R2	R3	Rata-rata	
1	10.498	10.983	10.738	10.739	265
2	11.298	12.687	11.256	11.080	142
3	12.074	12.423	12.122	12.206	130
4	10.670	10.179	11.827	10.892	136
5	12.540	11.321	11.869	11.910	126
6	12.341	12.518	12.187	12.348	289
7	11.077	10.642	10.699	10.806	122
8	11.115	9.912	11.096	10.707	277
9	11.445	12.326	12.187	11.986	148

Berdasarkan data pada Tabel 4.2. menunjukkan bahwa parameter proses *infill density* dan *layer thickness* mempengaruhi nilai massa produk dan waktu pencetakan. Nilai *density* yang semakin besar dengan kombinasi nilai *layer thickness* yang bervariasi akan meningkatkan massa produk seperti yang ditunjukkan pada hasil percobaan 3, 6 dan 9. Hal ini terjadi karena semakin tinggi nilai densitas maka akan membuat *gap* pada inti produk semakin rapat sehingga akan lebih banyak membutuhkan ekstrusi. Hal ini akan berpengaruh pada waktu proses yang dibutuhkan untuk mengekstrusi filamen. Sedangkan nilai *layer thickness* yang semakin kecil akan membutuhkan waktu pencetakan yang semakin lama seperti yang ditunjukkan pada hasil percobaan 1, 6, dan 8 dimana pencetakan menggunakan parameter proses *layer thickness* terkecil yaitu level 1 dengan nilai 0,1 mm. Hal ini terjadi karena nilai *layer thickness* yang kecil akan menghasilkan *slicing* dengan lapisan (*layer*) yang lebih banyak sehingga pergerakan *print head* dalam proses ekstrusi pencetakan menjadi lebih lama.

#### 4.1.2. Hasil Pengukuran Dimensi Produk

Pengukuran dimensi produk dilakukan dengan menggunakan acuan ukuran standar ASTM D638 tipe I meliputi *length overall* (LO), *width overall* (WO), *width* (W), dan *thickness* (T). Pengukuran dilakukan dengan mengukur tiga bagian untuk setiap dimensi selanjutnya menghitung nilai rata-ratanya. Bertujuan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih akurat. Panduan pengukuran dimensi spesimen ditunjukkan pada gambar 4.2. Data hasil pengukuran dimensi produk untuk setiap replikasi (R) dari percobaan ditunjukkan pada Tabel 4.3.



Gambar 4.3. Panduan pengukuran specimen

Keterangan :

LO : 165 mm (*no max*)

WO : 19 mm (+6.4)

W : 13 mm ( $\pm 0.5$ )

T : 4 mm ( $\pm 0.4$ )

Berdasarkan data hasil pengukuran dimensi produk untuk setiap replikasi (R) dari percobaan yang ditunjukkan pada table 4.3. Data dari hasil pengukuran dimensi w dan T diperoleh nilai yang mayoritas positif karena dimensi produk hasil 3D *printing*. Memiliki ukuran spesimen yang lebih besar dari pada ukuran standar ASTM D638 tipe 1 namun masih masuk dalam batas toleransi yang diijinkan.

Tabel 4.3 Data hasil pengukuran dimensi produk dalam satuan (mm)

percobaan	<i>length overall (LO)</i>			<i>width overall (WO)</i>			<i>width (W)</i>			<i>thickness (T)</i>		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	165.24	165.39	165.28	19.13	19.20	19.15	13.04	13.02	13.09	4.04	4.02	4.05
2	165.12	165.21	165.24	19.28	19.07	19.19	12.95	12.97	13.04	4.08	4.03	3.97
3	165.19	165.17	165.18	19.07	19.14	19.03	13.12	13.05	12.98	4.07	4.06	4.01
4	165.04	165.08	165.33	19.17	19.21	19.05	13.11	13.02	13.14	4	4.02	4.16
5	165.21	165.22	165.06	19.25	19.04	19.11	13.17	13.12	12.98	4	4.04	4.08
6	165.24	165.25	165.11	18.96	19.08	19.04	13.03	13.09	13.08	4.16	4.08	4.09
7	165.11	165.44	165.34	19.07	19.10	19.22	13.23	13.08	13.08	3.94	3.98	4.06
8	165.32	165.31	165.24	18.97	19.08	19.24	13.14	13.12	12.96	3.99	4.01	4.03
9	165.09	165.28	165.12	19.28	19.17	19.02	13.12	13.06	13.17	4.08	4.07	4.02

#### 4.1.3. Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan menggunakan metode standar pengujian ASTM D638 tipe 1 dengan menggunakan kecepatan pengujian sebesar 5 mm/menit. Spesimen setelah proses pengujian tarik ditunjukkan pada gambar 4.3 untuk spesimen I,II,dan III, gambar 4.4 untuk IV,V, dan VI, dan gambar 4.5 untuk spasimen VII,VIII,dan IX.



Gambar 4.4. Spesimen I,II,III



Gambar 4.5. Spesimen IV,V,VI

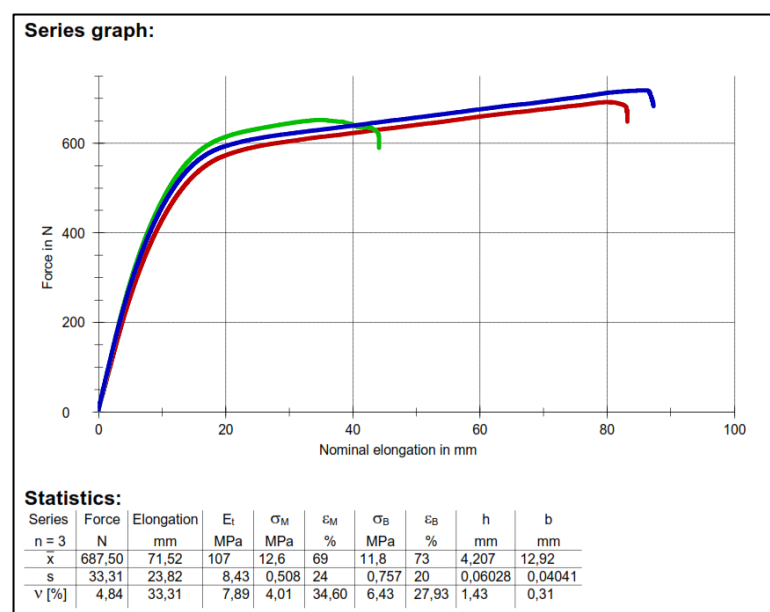


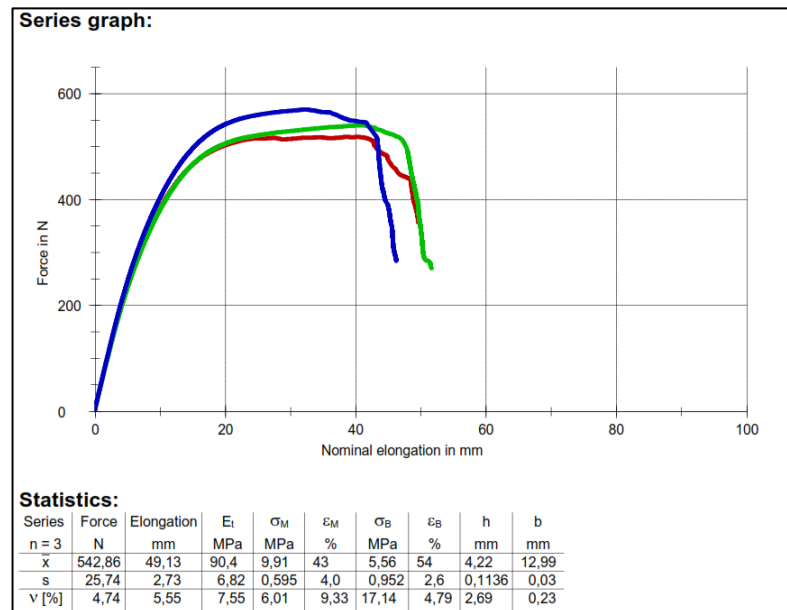
Gambar 4.6. Spesimen VII,VIII,IX

Setelah pengujian tarik yang telah dilakukan didapat nilai beban maksimal atau  $F_{max}$  untuk setiap spesimen yang diujikan. Dari pengujian tersebut didapat nilai  $F_{max}$  terbesar terdapat pada percobaan 6 replikasi yang terdapat di 3 ditunjukkan pada gambar 4.4 dan  $F_{max}$  terkecil terdapat pada percobaan 4 replikasi yang terdapat di 1 ditunjukkan pada gambar 4.4 Tabel nilai  $F_{max}$  ditunjukkan pada table 4.4.

Tabel 4.4. Nilai  $F_{max}$ 

No	$F_{max}$ (kgf)		
	R1	R2	R3
1	58.732	63.680	64.707
2	59.919	57.654	59.811
3	62.542	62.825	65.036
4	52.878	55.083	58.107
5	55.491	59.186	55.756
6	70.553	66.507	73.256
7	68.287	63.347	67.581
8	69.276	65.492	61.859
9	62.676	70.218	69.595

Gambar 4.7. Kurva  $F_{max}$  percobaan 6



Gambar 4.8. Kurva  $F_{max}$  percobaan 4

Berdasarkan kurva di atas dapat dilihat bahwa  $F_{max}$  pada awalnya rendah selanjutnya terjadi kenaikan nilai  $F_{max}$  diikuti dengan nilai perpanjangannya sampai pada akhirnya specimen putus. Hal tersebut terjadi karena pada saat proses pembebanan awal, beban yang diberikan belum mencapai titik maksimal sehingga yang berbentuk kurva pada  $F_{max}$  yang rendah sampai akhirnya beban naik hingga menemukan titik maksimalnya. Selanjutnya dengan didapatnya nilai  $F_{max}$  dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai tegangan Tarik (*tensile strength*). Perhitungan tegangan Tarik untuk hasil percobaan 6 replikasi 3 dan percobaan 4 reolikasi 1 adalah sebagai berikut :

Diketahui :

$$F_{6R3} = 73.256 \text{ kgf} = 718.40 \text{ N}$$

$$T_{4R1} = 4 \text{ mm}$$

$$F_{4R1} = 52.878 \text{ kgf} = 518.56 \text{ N}$$

$$W_{6R3} = 13.08 \text{ mm}$$

$$W_{4R1} = 13.11 \text{ mm}$$

$$T_{6R3} = 4.09 \text{ mm}$$



Ditanya :

$$\sigma = \dots\dots ?$$

Penyelesaian :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{w \times T}$$

$$\sigma_{6R3} = \frac{718.40 \text{ N}}{13.08 \text{ mm} \times 4.09 \text{ mm}} = 13.428 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{4R1} = \frac{518.56 \text{ N}}{13.11 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}} = 9.888 \text{ MPa}$$

Kemudian dilakukan perhitungan tegangan Tarik untuk semua specimen percobaan. Data hasil perhitungan *tensile strength* ditunjukan pada table 4.5.

Tabel 4.5. Data hasil perhitungan *tensile strength*

Percobaan	<i>Tensile Strength</i> (MPa)			Rata-rata (MPa)	Standar Deviasi
	R1	R2	R3		
1	10.866	11.931	11.969	11.588	0.62613
2	11.121	10.817	11.327	11.089	0.25656
3	11.485	11.628	12.253	11.788	0.40843
4	9.888	10.320	10.424	10.210	0.28423
5	10.330	10.950	10.324	10.534	0.3597
6	12.764	12.212	13.428	12.801	0.60885
7	12.847	11.933	12.480	12.420	0.45994
8	12.958	12.207	11.614	12.259	0.67354
9	11.482	12.954	12.891	12.442	0.83226

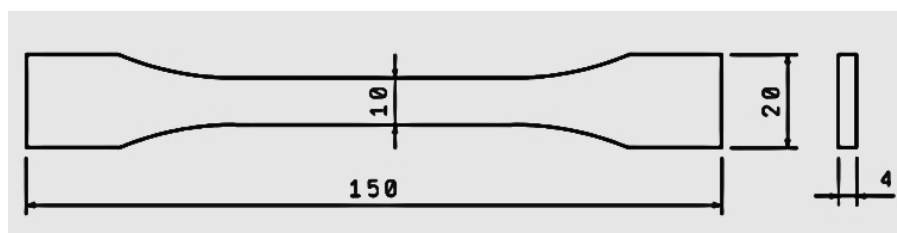
Setelah dilakukan perhitungan nilai tegangan tarik didapat nilai kekuatan tarik untuk setiap spesimen uji. Dari pengujian tersebut spesimen percobaan 6 replikasi ke 3 menghasilkan nilai tegangan tarik tertinggi yaitu sebesar 13,428 MPa, sedangkan nilai terendah dihasilkan oleh spesimen percobaan 4 replikasi ke 1 yang hanya menghasilkan nilai tegangan tarik sebesar 9,888 MPa seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5

Data nilai tegangan tarik dari penelitian ini lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Basavaraj dkk, (2016) walaupun dengan menggunakan bahan yang sama.

Tabel 4.6. Data nilai *tensile strength* penelitian Basavaraj dkk, (2016)

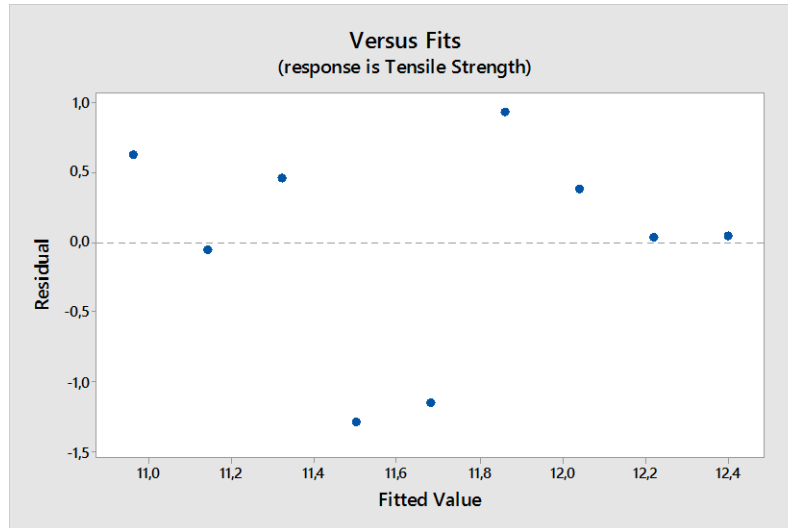
Percobaan	Parameter/level			<i>Tensile Strength</i> (MPa)
	Layer thickness	Orientation angle	Shell thickness	
1	0,1	0	0,4	19,05
2	0,1	15	0,8	19,18
3	0,1	30	1,2	25,48
4	0,2	0	0,8	9,51
5	0,2	15	1,2	15,68
6	0,2	30	0,4	7,71
7	0,3	0	1,2	8,35
8	0,3	15	0,4	8,83
9	0,3	30	0,8	11,82

Dalam hasil penelitiannya menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik maksimum sebesar 25,48 MPa dihasilkan oleh parameter *layer thickness* 0,1mm, *orientation angle* 30<sup>0</sup> dan *shell thickness* 1,2mm sedangkan nilai kekuatan tarik minimum sebesar 7,71 MPa dihasilkan oleh parameter *layer thickness* 0,2mm, *orientation angle* 30 dan *shell thickness* 0,4mm. Hal ini disebabkan karena perbedaan pengaturan parameter proses pencetakannya. dalam penelitiannya, Basavaraj menggunakan parameter proses *layer thickness*, *orientation angle* dan *shell thickness* sedangkan dalam penelitian ini menggunakan parameter proses *nozzle temperature*, *infill density* dan *layer thickness*.



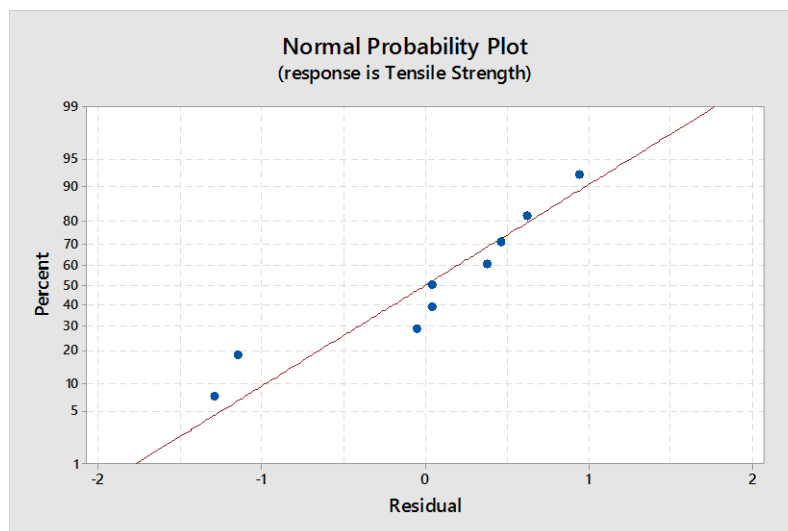
Gambar 4.9 Standar Dimensi TS (Basavaraj, 2016)

Selain itu perbedaan standar dimensi dalam pembuatan spesimen, produsen filamen yang digunakan dan kecepatan pengujian juga dapat mempengaruhi hasil nilai kekuatan tarik.



Gambar 4.10. Grafik *Versus fit* nilai tegangan tarik

Berdasarkan dari grafik versus fit diatas menunjukkan tingkat penyebaran data yang baik. Titik-titik tersebut menyebar dan tidak membentuk pola-pola tertentu, artinya pengacakan level yang dilakukan dalam penelitian ini berhasil sehingga data dapat dianalisis menggunakan SNR dan ANOVA.



Gambar 4.11. Grafik *Normal probability* nilai tegangan tarik

Berdasarkan dari grafik normal probability diatas menunjukkan tingkat normalitas data yang baik. Titik-titik tersebut terlihat dekat dengan garis lurus, artinya data dalam penelitian ini terdistribusi dengan normal sehingga data dapat dianalisis menggunakan SNR dan ANOVA.

#### 4.2. Analisis SNR dan ANOVA

Data pengukuran dimensi produk dan perhitungan *tensile strength* yang telah didapat selanjutnya dianalisis menggunakan *Signal to Noise Ratio* (SNR) dan *Analysis of Variance* (ANOVA).

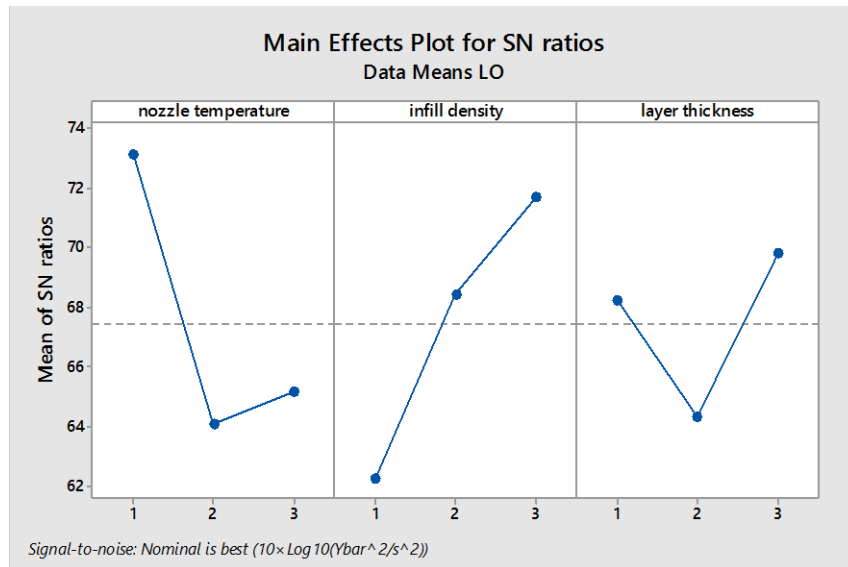
##### 4.2.1. Signal to Noise Ratio (SNR)

Penelitian ini menggunakan bantuan *software* Minitab 17 untuk menghitung nilai SNR. Penggunaan SNR bertujuan untuk mengetahui level factor atau parameter proses yang berpengaruh terhadap hasil respon (Soejanto, 2009: 28). Replikasi atau pengulangan yang dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap percobaan yaitu R1, R2, dan R3 digunakan untuk menghitung nilai SNR. Pemilihan metode perhitunga SNR disesuaikan berdasarkan target yang akan dituju pada penelitian ini dengan analisis menggunakan *software* Minitab 17.

Metode perhitungan SNR untuk respon dimensi produk dilakukan menggunakan metode SNR *Nominal The Best* (NTB) atau tertuju pada nilai tertentu karena dalam tahap ini target yang akan dituju adalah untuk menentukan level parameter yang menghasilkan nilai penyimpanan akurasi dimensi terkecil dengan cara memilih level parameter dengan nilai SNR tertinggi. *Software* Minitab 17 menampilkan hasil perhitungan nilai SNR dalam bentuk table respond dan grafik *main effect plot* dengan urutan dari yang paling berpengaruh.

Tabel 4.7. Respon dimensi LO

<i>Level</i>	<i>Nozzle Temperature</i>	<i>Infill density</i>	<i>Layer thickness</i>
1	73,12	62,26	68,21
2	64,08	68,45	64,35
3	65,18	71,68	69,82
<i>Delta</i>	9,04	9,42	5,47
<i>Rank</i>	2	1	3

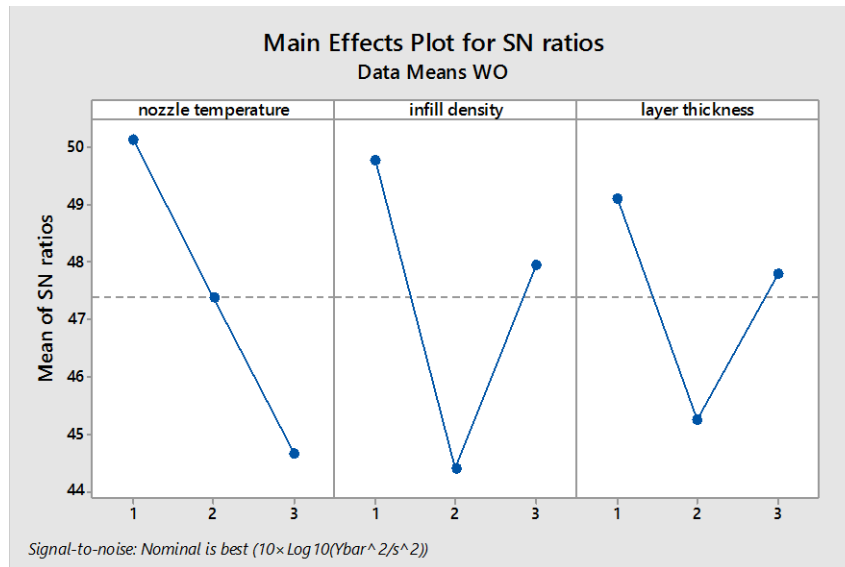


Gambar 4.12. Grafik *main effect plot* untuk SNR dimensi LO

Berdasarkan tabel 4.7 telah didapat respon SNR dimensi LO dari pengacakan level pada masing-masing parameter proses dengan melihat nilai *noise* terbesar. Pada respon SNR untuk dimensi LO level paling optimum adalah *nozzle temperature* level 1 (240 °C), *infill density* level 3 (70%), dan *layer thickness* level 3 (0.25mm). Grafik pengaruh parameter proses terhadap variabel respon yang merata pada tingkat parameter proses lain untuk dimensi LO yang ditunjukkan pada gambar 4.12. Parameter proses *nozzle temperature* pada level 1 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 73,12.

Tabel 4.8. Respon SNR dimensi WO

Level	Nozzle Temperature	Infill density	Layer thickness
1	50,14	49,79	49,11
2	47,38	44,41	45,26
3	44,65	47,97	47,80
Delta	5,49	5,39	3,86
Rank	1	2	3

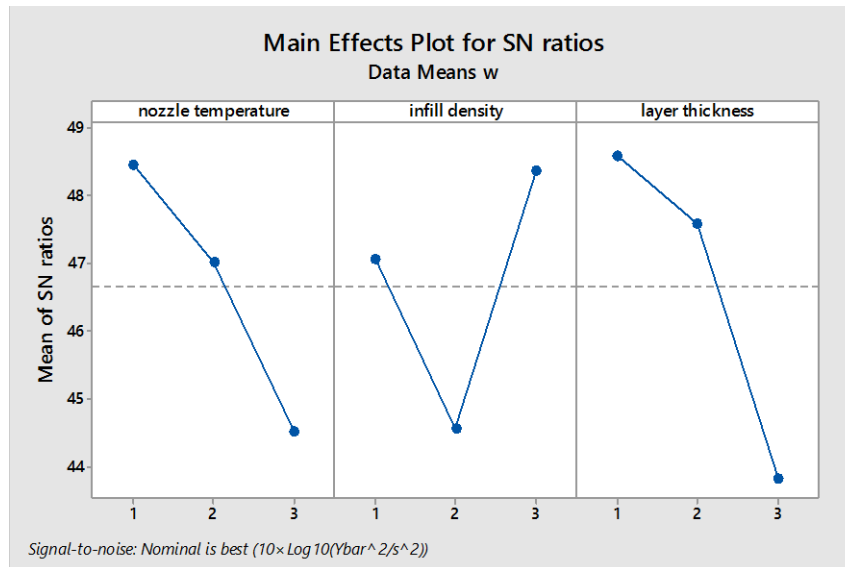


Gambar 4.13. Grafik *main effect plot* untuk SNR dimensi WO

Berdasarkan tabel 4.8 didapat respon SNR dimensi WO dari pengacakan level pada masing-masing parameter proses dengan melihat nilai *noise* terbesar. Pada respon SNR untuk dimensi WO level paling optimum adalah *nozzle temperature* level 1 (240 °C), *infill density* level 1 (50%), dan *layer thickness* level 1 (0,1mm). Grafik pengaruh parameter proses terhadap variabel respon yang merata pada tingkat parameter proses lain untuk dimensi WO yang ditunjukkan pada gambar 4.13. Parameter proses *nozzle temperature* pada level 1 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 50,14.

Tabel 4.9. Respon SNR dimensi *width*

Level	Nozzle Temperature	Infill density	Layer thickness
1	48,45	47,07	48,60
2	47,03	44,57	47,58
3	44,53	48,38	43,83
Delta	3,92	3,81	4,77
Rank	2	3	1

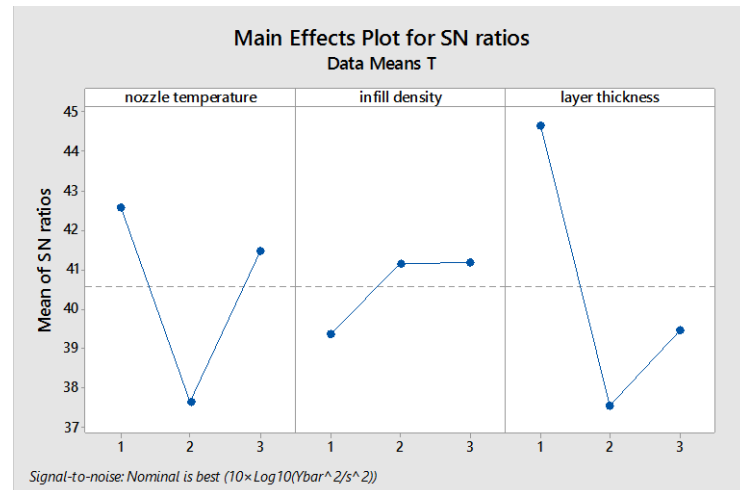


Gambar 4.14. Grafik *main effect plot* SNR dimensi *width*

Berdasarkan Tabel 4.9. telah didapat respon SNR dimensi *width*(w) dari pengacakan level pada masing-masing parameter proses dengan melihat nilai *noise* terbesar. Pada respon SNR untuk dimensi w level yang optimal dihasilkan oleh *nozzle temperature* level 1(240°C), *infill density* level 3 (70%), dan *layer thickness* level 1 (0,1mm). Grafik pengaruh parameter proses terhadap respon dimensi w ditunjukkan pada Gambar 4.14. Parameter proses *layer thickness* pada level 1 memiliki grafik nilai SNR tertinggi yaitu sebesar 48,60.

Table 4.10. Respon SNR dimensi *Thickness*

Level	Nozzle Temperature	Infill density	Layer thickness
1	42,57	39,37	44,66
2	37,65	41,14	37,55
3	41,46	41,17	39,46
Delta	4,93	1,80	7,10
Rank	2	3	1



Gambar 4.15. Grafik *main effect plot* SNR dimensi *Thickness*

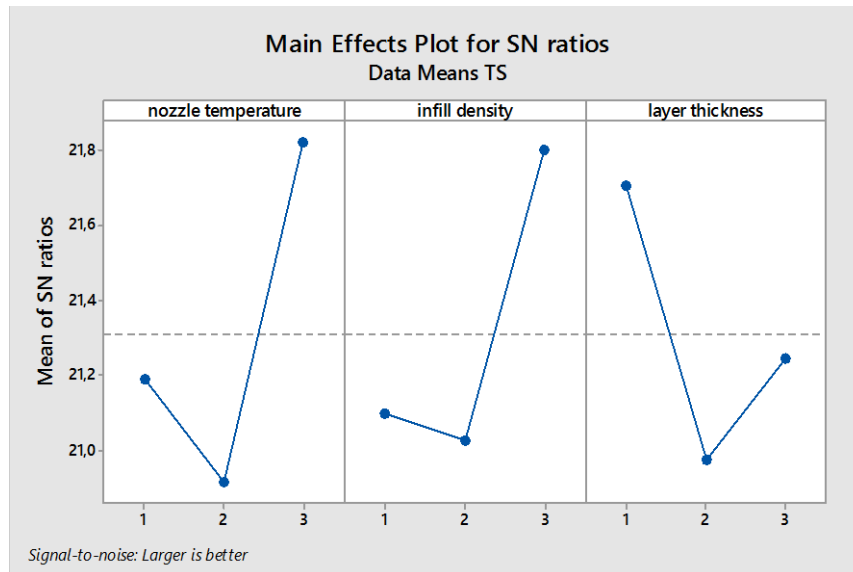
Berdasarkan Tabel 4.10 telah didapat respon dimensi *Thickness* (T) dari pengacakan level pada masing-masing parameter proses dengan melihat nilai *noise* terbesar. Pada respon SNR untuk dimensi T level yang optimal dihasilkan oleh *nozzle temperature* level 1 (240°C), *infill density* level 3 (70%), dan *layer thickness* level 1 (0,1mm). Grafik pengaruh parameter proses terhadap respon dimensi T ditunjukkan pada Gambar 4.15. Parameter proses *layer thickness* pada level 1 memiliki grafik nilai SNR tertinggi yaitu sebesar 44,66.

Metode perhitungan SNR untuk respon *Tensile Strength* (TS) atau tegangan tarik dilakukan menggunakan metode SNR *Larger The Better* (LTB) atau semakin besar semakin baik karena dalam tahap ini target yang akan dituju adalah untuk menentukan level parameter yang menghasilkan nilai *Tensile Strength* atau tegangan tarik tertinggi dengan cara memilih level parameter dengan nilai SNR tertinggi. Karakteristik kualitas pada SNR LTB terdiri dari angka nol sampai tak terhingga ( $\infty$ ) yang bukan negatif dengan nilai target yang diharapkan adalah selain nol atau tertuju pada nilai yang sebesar mungkin.

Table 4.11. Respon SNR Tegangan tarik

Level	Nozzle Temperature	Infill density	Layer thickness
1	21,19	21,10	21,71
2	20,91	21,03	20,97
3	21,82	21,80	21,24
Delta	0,91	0,77	0,73
rank	1	2	3





Gambar 4.16. Grafik *main effect plot* SNR Tegangan tarik

Berdasarkan Tabel 4.11. telah didapat respon tegangan tarik (TS) dari pengacakan level pada masing-masing parameter proses dengan melihat nilai *noise* terbesar. Pada respon SNR untuk nilai TS yang optimal dihasilkan oleh *nozzle temperature* level 3 (250°C), *infill density* level 3 (70%), dan *layer thickness* level 1 (0,1mm). Grafik pengaruh parameter proses terhadap respon nilai tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 4.16. Parameter proses *nozzle temperature* pada level 3 memiliki grafik nilai SNR tertinggi yaitu sebesar 21,82.

Tabel respon menyajikan level yang paling optimal dan tingkat pengaruh parameter proses terhadap variabel respon. Tabel respon berdasarkan nilai SNR menunjukkan hasil yang berbeda terhadap respon variabel yang berbeda sesuai dengan metode SNR yang digunakan. Tabel respon menunjukkan tingkat pengaruh faktor dengan melihat nilai selisih terbesar atau delta antara level satu sampai tiga. Seperti pada grafik respon SNR LO (Gambar 4.8) menunjukkan parameter proses *nozzle temperature* pada level 1 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 73,12, namun pada tabel respon parameter proses *nozzle temperature* hanya berada pada urutan ke 2 dari ketiga parameter yang paling berpengaruh terhadap respon nilai tegangan tarik. Sedangkan tingkat pengaruh faktor tertinggi dihasilkan oleh parameter *infill density* dengan nilai delta sebesar 9,42. Hal ini terjadi karena pengaruh dari pengacakan level dilihat dari nilai delta atau selisih terbesar dari level satu sampai tiga dimana pada respon SNR tegangan tarik parameter proses *nozzle temperature* memiliki nilai yang lebih kecil dibanding parameter *infill density*.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai delta pada tabel respon berarti semakin besar pengaruh pengacakan level pada parameter proses. Hal ini akan berlaku pada seluruh variabel respon yang digunakan pada penelitian ini. Dengan analisis SNR dapat diketahui level dari parameter proses mana yang paling optimal terhadap hasil eksperimen. Sehingga untuk menganalisis dan menguraikan seluruh variasi atas bagian-bagian yang diteliti perlu dilakukan pengklasifikasian terhadap hasil percobaan sesuai sumber dari variasi menggunakan ANOVA atau analisis varians.

#### 4.2.2. Analysis of Variance

Analisis varians atau ANOVA digunakan untuk mengetahui persen kontribusi setiap parameter proses dengan melakukan pengklarifikasian hasil-hasil percobaan secara statistik sesuai sumber-sumber varians. Ada beberapa klarifikasi yang dihitung pada analisis ANOVA meliputi  $St$ ,  $Sm$ ,  $Df$ ,  $Sq$  (setiap factor),  $St$ ,  $Mq$  (setiap factor),  $F$ -ratio,  $Sq'$ ,  $\rho\%$ , dan  $P$ -value. Pada penelitian ini ditentukan nilai *critical significant* atau *alpha-error* sebesar  $\alpha:0,05(5\%)$ . Nilai  $\alpha:0,05$  berarti bahwa penelitian ini menerima 5% kemungkinan kesalahan dalam mengklarifikasi sebagai factor penting ( $F$ -ratio) dan factor signifikan ( $P$ -value). Perhitungan ANOVA pada hasil dimensi LO adalah sebagai berikut :

Keterangan :

$A = \text{Nozzle Temperature}$

$B = \text{Extrusion Width}$

$C = \text{Feed Rate}$

$e = \text{Error}$

$T = \text{Jumlah Total}$

$N = \text{Jumlah Eksperimen}$

$n = \text{Jumlah Eksperimen Pada Faktor}$

1. Jumlah Kuadrat Total Data (ST)

$$ST = \sum y^2$$

$$\begin{aligned}
&= 165,3033^2 + 165,19^2 + 165,18^2 + 165,15^2 + 165,1633^2 + \\
&165,2^2 + 165,2966^2 + 165,29^2 + 165,1633^2 \\
ST &= 245664,4934
\end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Mean (Sm)

$$\begin{aligned}
Sm &= N \times \bar{y}^2 \\
&= 9 \times 165,2151^2 = 245664,4618
\end{aligned}$$

3. Jumlah Derajat Kebebasan

$$\begin{aligned}
Df &= level - 1 \\
&= 3 - 1 = 2 \\
Df_e &= V_oA - \sum Df \\
&= N - 1 - \sum Df \\
&= 9 - 1 - 6 = 2
\end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Faktor (SqA, SqB, SqC, Sqe)

$$\begin{aligned}
SqA &= \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_2^2}{n_{A2}} + \frac{A_3^2}{n_{A3}} + \frac{T^2}{N} \\
&= \frac{495,6733^2}{3} + \frac{495,5133^2}{3} + \frac{495,7499^2}{3} + \frac{1486,9365^2}{9} \\
&= 0,009716346
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SqB &= \frac{B_1^2}{n_{B1}} + \frac{B_2^2}{n_{B2}} + \frac{B_3^2}{n_{B3}} + \frac{T^2}{N} \\
&= \frac{495,7499^2}{3} + \frac{495,6433^2}{3} + \frac{495,5433^2}{3} - \frac{1486,9365^2}{9} \\
&= 0,007116346
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
SqC &= \frac{C_1^2}{n_{C1}} + \frac{C_2^2}{n_{C2}} + \frac{C_3^2}{n_{C3}} - \frac{T^2}{N} \\
&= \frac{495,7933^2}{3} + \frac{495,5033^2}{3} + \frac{495,6399^2}{3} - \frac{1486,9365^2}{9} \\
&= 0,014032346
\end{aligned}$$

$$Sqe = ST - Sm - SqA - SqB - SqC$$

$$\begin{aligned}
&= 245664,4934 - 245664,4618 - 0,009716346 - 0,007116346 \\
&\quad - 0,014032346 \\
&= 0,000734962
\end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Total ( $St$ )

$$\begin{aligned}
St &= SqA + SqB + SqC + Sqe \\
&= 0,009716346 + 0,007116346 + 0,014032346 + 0,000734962 \\
&= 0,0316
\end{aligned}$$

6. Rata-rata Jumlah Kuadrat ( $MqA, MqB, MqC, Mqe$ )

$$\begin{aligned}
MqA &= \frac{SqA}{DfA} \\
&= \frac{0,009716346}{2} = 0,004858173
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
MqB &= \frac{SqB}{DfB} \\
&= \frac{0,007116346}{2} = 0,003558173
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
MqC &= \frac{SqC}{DfC} \\
&= \frac{0,014032346}{2} = 0,007016173
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Mqe &= \frac{Sqe}{Dfe} \\
&= \frac{0,000734962}{2} = 0,000367481
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Mqt &= \frac{St}{Dft} \\
&= \frac{0,0316}{8} = 0,00395
\end{aligned}$$

7. Factor Rasio (F-ratio)

$$\begin{aligned}
F - ratio A &= \frac{MqA}{Mqe} \\
&= \frac{0,004858173}{0,000367481} = 13,22020186
\end{aligned}$$

$$F - ratio B = \frac{MqB}{Mqe}$$

$$= \frac{0,003558173}{0,000367481} = 9,682603999$$

$$F - ratio C = \frac{MqC}{Mqe}$$

$$= \frac{0,007016173}{0,000367481} = 19,09261431$$

8. Jumlah Kuadrat Sesungguhnya ( $SqA'$ ,  $SqB'$ ,  $SqC'$ ,  $SqD'$ ,  $Sqe'$ ,  $Sqt'$ )

$$SqA' = SqA - Df \times Mqe$$

$$= 0.009716346 - 2 \times 0.000367481 = 0,008981384$$

$$SqB' = SqB - Df \times Mqe$$

$$= 0.007116346 - 2 \times 0.000367481 = 0.006381384$$

$$SqC' = SqC - Df \times Mqe$$

$$= 0.014032346 - 2 \times 0.000367481 = 0.013297384$$

$$Sqe' = St - SqA' - SqB' - SqC'$$

$$= 0.0316 - 0.008981384 - 0.006381384 - 0.013297384$$

$$= 0,00293984$$

9. Persen Kontribusi ( $\rho\%$ )

$$\rho A = \frac{SqA'}{St} \times 100\%$$

$$= \frac{0,008981384}{0.0316} \times 100\% = 28,42\%$$

$$\rho B = \frac{SqB'}{St} \times 100\%$$

$$= \frac{0.006381384}{0.0316} \times 100\% = 20,19\%$$

$$\rho C = \frac{SqC'}{St} \times 100\%$$

$$= \frac{0.013297384}{0.0316} \times 100\% = 42,0803\%$$

$$\rho e = \frac{Sqe'}{St} \times 100\%$$

$$= \frac{0,002939848}{0.0316} \times 100\% = 9,3033\%$$

#### 10. *Probability values (P-value)*

Nilai P dihitung dengan metode interpolasi menggunakan angka ketetapan pada table distribusi F berdasarkan nilai *F-ratio* yang telah didapat. Nilai  $Df_1$  (Df pada factor) dan  $Df_2$  (Df *error*) digunakan untuk menentukan nilai  $\alpha$  berdasarkan data pada table distribusi F didapat nilai  $\alpha = P = 0,121$ .

Selanjutnya hasil perhitungan diatas diklarifikasikan dalam table ANOVA. Pada table ANOVA hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan tingkat pengaruh pada parameter proses adalah nilai *F-ratio*, *P-value*, dan  $\rho$ . Nilai F yang tersaji didalam table ANOVA nilai F yang tercantum adalah nilai F-hitung atau nilai *F-ratio*. Untuk itu supaya dapat melakukan uji F maka diperlukan nilai F-tabel yang dicari menggunakan table distribusi F. nilai F-tabel dicari berdasarkan nilai  $\alpha$  yang digunakan pada penelitian ini yaitu menggunakan  $\alpha : 0,05$  (5%), nilai derajat kebebasan factor (Df) dan derajat kebebasan *error*. Karena pada penelitian ini semua factor memiliki Df sebesar 2 maka nilai F table untuk semua faktor sama. Berdasarkan nilai F (0.5, 2, 2) didapat nilai F table yaitu sebesar 19,00. Selanjutnya dilakukan uji F, apabila F-hitung memiliki nilai lebih kecil dari F-tabel ( $F_{ratio} < F_{tabel}$ ), maka hipotesis ( $H_0$ ) diterima yang berarti tidak ada pengaruh perlakuan pada faktor. Namun jika nilai F hitung lebih besar dari F table ( $F_{ratio} > F_{tabel}$ ), maka hipotesis ( $H_0$ ) ditolak atau ada pengaruh pada perbedaan perlakuan (Soejanto, 2009:27).

Besarnya nilai *P-value* digunakan untuk mengetahui dan menentukan tingkat signifikansi pada parameter proses atau faktor sesuai dengan nilai *critical significant* atau  $\alpha$  (*alpha error*) yang telah ditentukan dan digunakan sebagai acuan, jika nilai *P-value* lebih kecil dari nilai  $\alpha$  (0,05) maka faktor tersebut signifikan dan begitu sebaliknya jika nilai *P-value* lebih besar dari nilai  $\alpha$  (0,05) maka faktor menjadi tidak signifikan. Selanjutnya nilai  $\rho$  menunjukkan tingkat kontribusi suatu faktor yang hasilnya disajikan dalam satuan persen. Semakin besar nilai  $\rho$  maka semakin besar kontribusi faktor tersebut terhadap suatu respon. Table ANOVA untuk dimensi LO ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12. Persen kontribusi parameter terhadap dimensi *length overall*

Source	Sq	Df	Mq	F-ratio	Sq'	P	p%
<i>Nozzle Temperature</i>	0,0097	2	0,0048	13,22	0,0089	0,1211	28,4221
<i>Density</i>	0,0071	2	0,0035	9,682	0,0063	0,1034	20,1942
<i>Layer Thickness</i>	0,014	2	0,007	19,092	0,0132	0,0501	42,0803
<i>E</i>	0,0007	2	0,0003	-	0,0029	-	9,3033
St	0,0316	8	0,0039	-	-	-	100
Mean	245664,462	2	-	-	-	-	-
ST	245664,493	9	-	-	-	-	-

Berdasarkan data perhitungan ANOVA pada Tabel 4.12 dapat dilihat besar persen kontribusi dan pengaruh dari parameter proses terhadap respon dimensi *length overall* atau LO. pada table tersebut parameter *Layer Thickness* menghasilkan nilai persen kontribusi terbesar yaitu 42,0803% sehingga dapat disimpulkan bahwa parameter *Layer Thickness* merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap respon dimensi LO dari pada faktor-faktor lainnya. Untuk nilai F-ratio hanya  $H_0$  dari parameter *nozzle temperature* dan *Density* yang diterima artinya pada faktor tersebut tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan. Sedangkan dari nilai *P-value* ketiga parameter proses ini tidak masuk kriteria karena nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$  yaitu sebesar 0,1211, 0,1034 dan 0,0501 ini menunjukkan bahwa parameter tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon dimensi *length overall*.

Tabel 4.13. Persen kontribusi parameter terhadap dimensi *width overall*

Source	Sq	Df	Mq	F-ratio	Sq'	P	p%
nozzle temperature	0,0023	2	0,0011	0,71	-0,0009	0,584	-5,3078
density	0,0056	2	0,0028	1,7	0,0023	0,371	12,8203
layer thickness	0,0067	2	0,0033	2,03	0,0034	0,33	18,9439
E	0,0033	2	0,0016	-	0,0133	-	73,5435
St	0,0181	8	0,0022	-	-	-	100
Mean	3291,16774	2	-	-	-	-	-
ST	3291,197366	9	-	-	-	-	-

Berdasarkan data perhitungan ANOVA pada table 4.13 dapat dilihat besar persen kontribusi dan pengaruh dari parameter proses terhadap respon dimensi *width overall* atau WO. Pada table ini nilai error menghasilkan nilai persen kontribusi terbesar yaitu 73,5435% sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat parameter lain yang lebih berpengaruh terhadap respon dimensi *width overall* dari pada ketiga parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini. Untuk nilai F  $H_0$  dari ketiga factor diterima yang artinya semua factor tersebut tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan. Sedangkan nilai *P-value* dari semua parameter proses memiliki nilai yang tidak masuk kriteria karena nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$ : 0,05 ini menunjukkan bahwa semua factor tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon dimensi *width overall*.

Tabel 4.14. Persen kontribusi parameter terhadap dimensi *width*

Source	Sq	Df	Mq	F-ratio	Sq'	P	p%
nozzle temperature	0,0094	2	0,0047	10,47	0,0085	0,087	60,1022
density	0,0025	2	0,0012	2,78	0,0016	0,264	11,3063
layer thickness	0,0013	2	0,0006	1,51	0,0004	0,399	3,2133
E	0,0009	2	0,0004	-	0,0036	-	25,378
St	0,0142	8	0,0017	-	-	-	100
Mean	1538,0123	2	-	-	-	-	-
ST	1538,0422	9	-	-	-	-	-

Berdasarkan data perhitungan ANOVA pada Tabel 4.14 dapat dilihat besar persen kontribusi dan pengaruh dari parameter proses terhadap respon dimensi *width* atau w. pada table tersebut parameter *Nozzle temperature* menghasilkan nilai persen kontribusi terbesar yaitu 60,1022% sehingga dapat disimpulkan bahwa parameter *Nozzle temperature* merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap respon dimensi *width* dari pada faktor-faktor lainnya. Untuk nilai F  $H_0$  dari ketiga factor diterima yang artinya semua factor tersebut tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan. Sedangkan nilai *P-value* dari semua parameter proses memiliki nilai yang tidak masuk kriteria karena nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$ : 0,05 ini menunjukkan bahwa semua factor tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon dimensi *width*.



Table 4.15. Persen kontribusi parameter terhadap dimensi *thickness*

Source	Sq	Df	Mq	F-ratio	Sq'	P	p%
nozzle temperature	0,0038	2	0,0019	75	0,0038	0,013	43,3853
density	0,0037	2	0,0018	73	0,0037	0,014	42,2094
layer thickness	0,0011	2	0,0005	21,57	0,001	0,044	12,0646
E	0,00005	2	0,00002	-	0,0002	-	2,3405
St	0,0088	8	0,0011	-	-	-	100
Mean	147,0471	2	-	-	-	-	-
ST	147,0624	9	-	-	-	-	-

Berdasarkan data perhitungan ANOVA pada Tabel 4.15 dapat dilihat besar persen kontribusi dan pengaruh dari parameter proses terhadap respon dimensi *thickness* atau T. pada table diatas nilai *nozzle temperature* dan *density* menghasilkan nilai persen kontribusi sebesar yaitu 43,3853% dan 42,2094% sehingga dapat disimpulkan bahwa kedua parameter ini merupakan sama-sama berpengaruh terhadap respon dimensi *thickness* dari pada factor parameter *layer thickness*. Nila F-ratio dan nilai P-value dari semua parameter proses memiliki nilai yang masuk kriteria karena nilainya lebih kecil dari nilai  $\alpha : 0,05$ , ini menunjukkan bahwa semua faktor memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon dimensi *thickness*.

Table 4.16. Persen kontribusi parameter terhadap tegangan Tarik

Source	Sq	Df	Mq	F-ratio	Sq'	P	p%
nozzle temperature	2,2982	2	1,1491	2,82	1,4826	0,262	22,5899
density	1,9941	2	0,997	2,44	1,1785	0,29	17,9564
layer thickness	1,4552	2	0,7276	1,78	0,6396	0,359	9,7453
E	0,8156	2	0,4078	-	3,2624	-	49,7082
St	6,5631	8	0,8203	-	-	-	100
Mean	1228,0585	2	-	-	-	-	-
ST	1234,6223	9	-	-	-	-	-

Berdasarkan data perhitungan ANOVA pada Tabel 4.16 dapat dilihat besar persen kontribusi dan pengaruh dari parameter proses terhadap respon nilai tegangan Tarik atau TS. Pada table ini nilai eror menghasilkan nilai persen kontribusi terbesar yaitu 49,7082% sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat parameter lain yang lebih berpengaruh terhadap respon nilai tegangan tarik dari pada ketiga parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini. Untuk nilai F Ho dari ketiga factor diterima yang artinya semua factor tersebut tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan. Sedangkan nilai *P-value* dari semua parameter proses memiliki nilai yang tidak masuk kriteria karena nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$ : 0,05 ini menunjukkan bahwa semua factor tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon nilai tegangan tarik.

### 4.3. Analisis Parameter Optimal

Berdasarkan analisis menggunakan nilai SNR dan identifikasi menggunakan ANOVA dapat diketahui level yang optimal dan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap masing-masing hasil variabel respon penelitian. Untuk level parameter proses optimaln berdasarkan SNR ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Table 4.17. Level parameter proses optimal berdasarkan hasil SNR

Respon	<i>Nozzle Temperature</i> (°)	<i>Infill density</i> (%)	<i>Layer thickness</i> (mm)
Dimensi LO	240	70	0,25
Dimensi WO	240	50	0,1
Dimensi w	240	70	0,1
Dimensi T	240	70	0,1
<i>Tensile Strength</i>	250	70	0,1

Berdasarkan tabel 4.17 menunjukkan perbedaan pada hasil optimasi untuk respon akurasi dimensi dan kekuatan tarik. Berbeda dengan respon kekuatan tarik, pada respon akurasi dimensi optimasi lebih sulit dilakukan karena satu respon terdiri dari empat dimensi dengan hasil optimasi yang berbeda-beda. Sehingga pada hasil optimasi dapat dipertimbangkan kembali dengan melihat pengaruh dari masing-masing parameter proses untuk memilih level terbaiknya. Untuk

mengetahui pengaruh dari masing parameter proses dapat dilakukan dengan melihat tabel peringkat parameter proses optimum berdasarkan SNR yang ditunjukkan pada tabel 4.18 dan parameter proses optimum berdasarkan kontribusi ANOVA yang ditunjukkan pada tabel 4.19.

Tabel 4.18. Parameter proses optimal berdasarkan hasil SNR

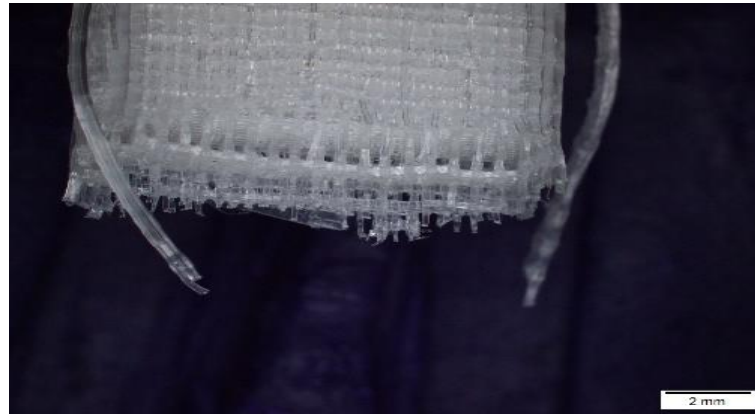
Rank	Dimensi LO	Dimensi WO	Dimensi w	Dimensi T	<i>Tensile Strength</i>
1	<i>Infill density</i>	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Layer thickness</i>	<i>Layer thickness</i>	<i>Nozzle temperature</i>
2	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Infill density</i>	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Infill density</i>
3	<i>Layer thickness</i>	<i>Layer thickness</i>	<i>Infill density</i>	<i>Infill density</i>	<i>Layer thickness</i>

Tabel 4.19. Parameter proses optimal berdasarkan hasil ANOVA

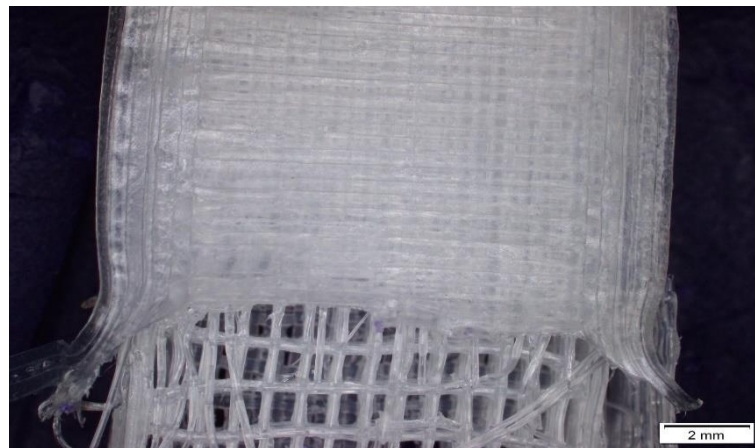
Rank	Dimensi LO	Dimensi WO	Dimensi w	Dimensi T	<i>Tensile Strength</i>
1	<i>Layer thickness</i>	<i>Layer thickness</i>	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Nozzle temperature</i>
2	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Infill density</i>	<i>Infill density</i>	<i>Infill density</i>	<i>Infill density</i>
3	<i>Infill density</i>	<i>Nozzle temperature</i>	<i>Layer thickness</i>	<i>Layer thickness</i>	<i>Layer thickness</i>

Berdasarkan table hasil analisis SNR dan ANOVA diatas menunjukkan hasil yang sama untuk tingkat urutan parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon tegangan Tarik. Parameter proses *nozzle temperature* menunjukkan hasil yang dominan untuk respon dimensi produk dan kekuatan Tarik. Hal ini ditunjukkan pada parameter *nozzle temperature* yang berada pada peringkat pertama untuk dimensi T ( $p$ : 43,3853%), w ( $p$ : 60,1022%), termasuk *tensile strength* TS ( $p$ : 22,5899), dan berada diperingkat kedua pada dimensi LO ( $p$ :

28,4221), dan yang ketiga pada dimensi WO ( $\rho$ : -5,3078). sehingga nozzle temperature menjadi parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon pada penelitian ini secara keseluruhan.



Gambar 4.17. Foto mikro pada area patahan 70%



Gambar 4.18. Foto mikro pada area patahan 50%

Berdasarkan Gambar 4.18. diatas menunjukkan foto perbesaran diarea patahan yang terlihat jelas bahwa lapisan luar patahan (*shell*) terlepas dari lapisan dalam (*infill density*) pada spesimen tersebut. Lapisan luar (*shell*) yang memulur akibat pembebanan yang diberikan saat proses pengujian tarik. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan nilai *infill density* yang mempengaruhi terlepasnya lapisan luar (*shell*) , nilai *infill density* untuk yang paling rendah yaitu sebesar 50% mempengaruhi terlepasnya lapisan luar sedangkan nilai *infill density* untuk yang paling besar sebesar 70% dapat dilihat bahwa sedikit lebih baik pada area patahan terdapat pada gambar 4.17.

Pada penelitian ini parameter proses *nozzle temperature* menunjukkan hasil yang dominan untuk respon akurasi dimensi produk. Untuk mengetahui tingkat

akurasi dimensi produk dilakukan dimensi *error*. Tujuannya yaitu untuk mengetahui nilai penyimpangan dimensi yang terjadi pada setiap specimen produk printer 3D akibat variasi nilai *nozzle temperature* yang dilakukan. Perhitungan dimensi *error* dilakukan dengan cara menghitung selisih ukuran dimensi specimen dengan ukuran standar ASTM D638 tipe 1. Perhitungan dimensi *error* adalah sebagai berikut :

$$\Delta D = D_1 - D_2 \dots \dots \dots (4.1.)$$

- Dimana :  $\Delta D$  : dimensi *error*
- $D_1$  : dimensi produk
- $D_2$  : dimensi standar

Berdasarkan perhitungan menggunakan rumus diatas didapat data dimensi *error* pada penelitian ini yaitu dimensi LO, W, w dan T. data dimensi *error* ditunjukkan pada Tabel 4.20. Selanjutnya data dari rata-rata dimensi *error* disajikan dalam bentuk diagram batang untuk melihat pengaruh variasi parameter *nozzle temperature* terhadap dimensi *error*. Grafik pengaruh *nozzle temperature* ditunjukkan pada gambar 4.16

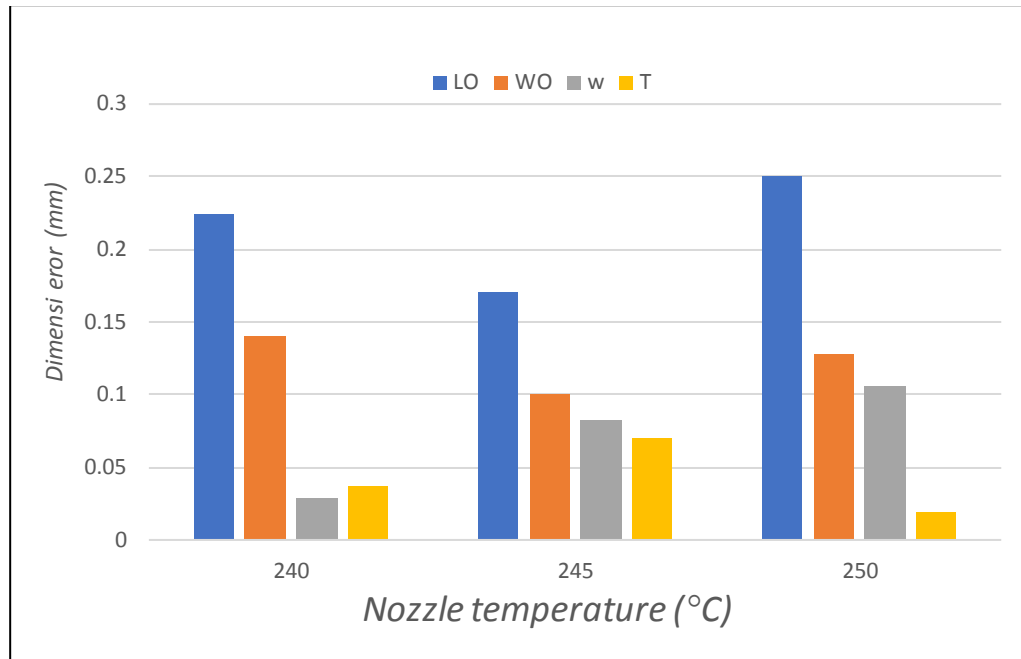
Tabel 4.20. Data dimensi *error*.

<i>Nozzle Temperature</i>	LO (mm)	WO (mm)	w (mm)	T (mm)
240°C	0,3033	0,16	0,05	0,0366
	0,19	0,18	-0,014	0,0266
	0,18	0,08	0,05	0,0466
Rata-rata	0,2244	0,14	0,0286	0,0366
245°C	0,15	0,1433	0,09	0,06
	0,1633	0,1333	0,09	0,04
	0,2	0,0266	0,0666	0,11
Rata-rata	0,1711	0,101	0,082	0,07
250°C	0,2966	0,13	0,13	-0,01
	0,29	0,0966	0,0733	0,01
	0,1633	0,1566	0,1166	0,0566
Rata-rata	0,2499	0,1277	0,1066	0,0188

Berdasarkan data pada Tabel 4.20 hasil perhitungan dimensi *error* memiliki perbedaan nilai penyimpangan ukuran pada tiap-tiap specimen yang disebabkan

oleh beberapa hal antara lain disebabkan oleh kecepatan gerak *nozzle* dan nilai temperature yang diterapkan. Secara teori nilai temperature pencetakan yang lebih rendah atau lebih tinggi mengakibatkan bentuk ekstrusi yang keluar menjadi kurang sempurna karena sifat polimer yang sangat sensitif terhadap temperature. Sehingga menyebabkan bahan polimer yang dilelehkan akan mengalami penyusutan atau justru mengalami penambahan dimensi pada produk dan mengakibatkan nilai penyimpangan dimensinya menjadi kurang baik.

Dari data yang diperoleh setelah dilakukan perhitungan dengan cara menyelisihkan antara ukuran dimensi specimen dengan ukuran standar ASTM D638 tipe 1. Hasil yang diperoleh pada penyimpangan dimensi LO, WO, W dan T memiliki nilai rata-rata yang mayoritas positif karena dimensi produk hasil 3D *printing* memiliki ukuran specimen yang lebih besar daripada ukuran standar ASTM D638 tipe 1 namun masih masuk dalam batas toleransi yang diijinkan. Rata-rata penyimpangan terbaik untuk penyimpangan dimensi LO dan WO ditunjukkan pada temperature *nozzle* sebesar 245°C karena nilai selisihnya lebih sedikit daripada suhu 240°C dan 250°C, Rata-rata penyimpangan terbaik untuk penyimpangan dimensi W ditunjukkan pada temperature *nozzle* sebesar 240°C karena nilai selisihnya lebih sedikit daripada suhu 245°C dan 250°C. Sedangkan rata-rata penyimpangan terbaik untuk penyimpangan dimensi T ditunjukkan pada temperature *nozzle* sebesar 250°C karena nilai selisihnya lebih sedikit daripada suhu 240°C dan 245°C. Dengan data diatas dapat disimpulkan bahwa seluruh specimen mengalami pertambahan dan specimen yang memiliki nilai penyimpangan terkecil berarti mempunyai nilai dimensi *error* yang baik karena semakin kecil nilai penyimpangan berarti semakin baik nilai keakuarian dimensi produk yang dicetak.



Gambar 4.19. Pengaruh *nozzle temperature* terhadap dimensi *error*

Berdasarkan diagram batang pada Gambar 4.19. menunjukkan perbedaan nilai dimensi *error* dengan variasi kenaikan dan penurunan pada setiap nilai level temperature *nozzle*. Variasi kenaikan dan penurunan yang terjadi kemungkinan disebabkan kurang maksimalnya pada saat proses pencetakan produk 3D *printing* karena alat *printer* yang digunakan mengalami proses yang tidak stabil. Pada praktiknya suhu *nozzle* pada alat 3D *printer* tidak menunjukkan suhu yang konstan melainkan mengalami variasi kenaikan dan penurunan yang tidak stabil pada kisaran  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , selain itu temperature yang dideteksi oleh *thermocouple* belum tentu sama dengan temperature asli di dalam *extruder* atau *print head*. Hal ini yang membuat sulitnya untuk mencetak produk 3D *printing* yang benar-benar mendekati sempurna, sehingga beberapa kecacatan produk diabaikan.

Parameter proses *infill density* penggunaan nilai yang besar akan menghasilkan produk yang kuat karena memiliki masa yang lebih besar, namun memiliki waktu proses yang lebih lama. Dalam pemilihan *infill density* harus melihat kembali aplikasi dari produk yang akan dicetak. Pada pencetakan produk yang lebih besar penggunaan *infill density* sebesar 70% mungkin disarankan pada penelitian ini karena cukup kuat dan memiliki waktu proses yang lebih sedikit. Namun pada parameter proses ini tidak terlalu signifikan terhadap respon dimensi produk, hanya saja efek waktu proses yang disebabkan parameter proses ini

mungkin dapat berpengaruh terhadap bentuk produk mengingat ada temperatur pada *bed* yang diterapkan sehingga produk akan berada lebih lama pada temperatur yang diterapkan.

#### 4.4. Eksperimen Konfirmasi

Hasil analisis SNR dan ANOVA yang telah didapat selanjutnya digunakan untuk pemilihan parameter proses, level, dan sebagai kesimpulan awal dalam menentukan kombinasi level yang paling optimal terhadap respon karena adanya pengacakan kombinasi level pada setiap nomor percobaan yang ada didesain factorial. Desain eksperimen yang berbentuk fraksional atau adanya pemisahan bagian-bagian membuat kemungkinan kombinasi level dan parameter proses yang paling optimal tidak muncul pada kombinasi level percobaan *orthogonal array*. Sehingga perlu dilakukan eksperimen konfirmasi untuk melakukan pengujian dan pembuktian kombinasi level parameter proses optimal yang telah didapat.

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk menguji kombinasi level parameter proses yang telah didapat dari hasil analisis SNR dan ANOVA. Eksperimen atau *tensile strength* (ST). level parameter proses optimal yang digunakan untuk eksperimen konfirmasi sesuai dari hasil analisis SNR LTB nilai respon tegangan tarik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.21.

Table 4.21. Level parameter proses optimal untuk respon kekuatan tarik

Parameter Proses	Level Optimal
<i>Nozzle Temperature</i>	250 <sup>0</sup> C
<i>Infill density</i>	70 %
<i>Layer thickness</i>	0,1 mm

Sebelum melakukan eksperimen konfirmasi perlu dilakukan beberapa tahapan terlebih dahulu yang meliputi *pooling-up* faktor yang tidak signifikan pada hasil ANOVA tegangan tarik, melakukan perhitungan prediksi rata-rata ( $\mu$ ) tegangan tarik, dan perhitungan interval kepercayaan.

##### 4.4.1. *Pooling* Faktor Tidak Signifikan



Pada table ANOVA terdapat nilai F-ratio dan P-value yang menunjukkan tingkat pengaruh dan signifikansi parameter proses respon nilai tegangan tarik. Berdasarkan data dari table distribusi F (0.5, 2, 2) yaitu sebesar 19,00 dan nilai P-value pada  $\alpha : 0.5$ , semua parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini memiliki pengaruh dan menunjukkan hasil yang signifikan terhadap respon tegangan tarik. Table ANOVA hanya menunjukkan signifikan atau tidaknya faktor tersebut, sehingga perlu dilakukannya *pooling* atau menambahkan jumlah kuadrat dari faktor yang memiliki Sq (jumlah kuadrat) terkecil sampai memiliki setengah dari nilai Df (derajat kebebasan) untuk menghindari kesalahan dalam analisis. Pada penelitian ini desain factorial yang digunakan adalah *orthogonal arrays* L9 ( $3^3$ ) dengan nilai Df sebanyak 6 maka *pooling* dilakukan hingga Df berjumlah 4 atau dengan menghilangkan 1 parameter proses, selanjutnya memasukkan nilai Sq dan Df pada faktor *error*. Parameter proses, dengan Sq terkecil dihasilkan oleh parameter *nozzle temperature* (SqA) yaitu sebesar 2,2982. Pada tahap *pooling* parameter proses yang tidak signifikan diasumsikan menjadi bagian dari faktor *error* atau dianggap tidak ada dalam analisis varians. Perhitungan *pooling* faktor *error* adalah sebagai berikut :

1.  $Sq (pooled e) = Se + SqA$   
 $= 0,8156 + 2,2982 = 3,1138$
2.  $Df (pooled e) = Df_e + Df_A$   
 $= 2 + 2 = 4$

Berdasarkan perhitungan *pooling* faktor *error* selanjutnya melakukan perhitungan ulang ANOVA. Selanjutnya hasil *pooling* dimasukkan dalam table ANOVA akhir seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22. Hasil ANOVA akhir

Source	Sq	Df	Mq	F-ratio	Sq'	P	p%
<i>Infill density</i>	1,9941	2	0,997	1,2807	0,4372		6,6614
<i>Layer thickness</i>	1,4552	2	0,7276	0,9346	-0,1017		-1,5495
<i>E</i>	3,1138	4	0,77845	-	6,2276	-	94,888
<i>St</i>	6,5631	8	0,8203	-	-	-	100

Mean	1228,0585	2	-	-	-	-	-
ST	1234,6223	9	-	-	-	-	-

#### 4.4.2. Rata-rata prediksi dan interval kepercayaan

Perhitungan rata-rata prediksi atau  $\mu$  terhadap nilai tegangan tarik bertujuan untuk memperkirakan nilai tegangan tarik berdasarkan hasil kombinasi level parameter optimal yang telah didapat dalam penelitian ini. Nilai  $\mu$  menunjukan nilai kisaran pada tingkat kepercayaan tertentu atau disebut interval kepercayaan. Interval kepercayaan merupakan nilai batas minimum dan maksimum dimana hasil penelitian ini diharapkan akan berada didalam interval kepercayaan tersebut. *Confidence interval* (CI) atau tingkat kepercayaan tertentu dengan nilai sebesar 95% atau  $\alpha: 0.05$  yang artinya 95% dari rata-rata hasil akan berada diantara interval yang ditentukan. Nilai  $\alpha: 0.05$  juga digunakan untuk mencari nilai F-tabel pada tabel distribusi F yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan CI. Berikut adalah perhitungan nilai  $\mu_{\text{prediksi}}$  TS dan CI.

Diketahui:

$\bar{y}$	: 11,6812
$\bar{A}_3$	: 12,3739
$\bar{B}_1$	: 12,3436
$\bar{C}_2$	: 12,216
$F_{(0.05;1;4)}$	: 7,71
$MSe$ (pooled e TS)	: 0,77845
N	: 9
Df $\mu$	: 1
Df factor	: 6

Ditanya:

- $\mu_{\text{prediksi}}$  TS
- CI

Penyelesaian:

- $\mu_{\text{prediksi}}$  TS

$$\mu_{\text{prediksi}} \text{ TS} = \bar{y} + (\bar{A}_3 - \bar{y}) + (\bar{B}_1 - \bar{y}) + (\bar{C}_2 - \bar{y})$$

$$\begin{aligned}
&= 11,6812 + ( 12,3736 - 11,6812 ) + ( 12,3436 - 11,6812 ) \\
&\quad + ( 12,216 - 11,6812 ) \\
&= 13,5708 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

$$b. \text{ CI} = \pm \sqrt{F_{\alpha.v1.v2} \times Mse \times \left( \frac{1}{n_{eff}} \right)}$$

$$n_{eff} = \frac{N}{df_{\mu} + df_A + df_B + df_C}$$

$$n_{eff} = \frac{9}{1 + 6} = \frac{9}{7} = 1,2857$$

$$CI = \pm \sqrt{7,71 \times 0,77845 \times \left( \frac{1}{1,2857} \right)} = \pm 2,1605$$

Jadi dengan perhitungan  $\mu_{prediksi}$  dan CI didapat nilai interval kepercayaan untuk rata-rata prediksi level parameter proses optimal adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\mu_{prediksi} - CI &\leq \mu_{prediksi} \leq + CI \\
13,5708 - 2,1605 &\leq 13,5708 \leq 13,5708 + 2,1605 \\
11,4103 &\leq 13,5708 \leq 15,7313
\end{aligned}$$

#### 4.4.3. Hasil dan Analisis Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilaksanakan dengan cara membuat spesimen yang proses pengerjaannya menggunakan hasil kombinasi level optimal berdasarkan hasil yang telah didapat pada analisis SNR. Selain itu, pada eksperimen konfirmasi hasil perhitungan prediksi untuk memperkirakan nilai tegangan Tarik yang akan didapatkan. Pembuatan spesimen eksperimen konfirmasi berjumlah 1 percobaan dengan 3 kali pengulangan yang setiap replikasinya membutuhkan waktu pengerjaan selama 289 menit. Selanjutnya spesimen eksperimen konfirmasi dilakukan pengujian Tarik menggunakan metode standar pengujian ASTM D-638 untuk tipe 1 yaitu menggunakan kecepatan pengujian sebesar 5 mm/menit. Hasil uji Tarik spesimen eksperimen konfirmasi ditunjukkan pada gambar 4.20.

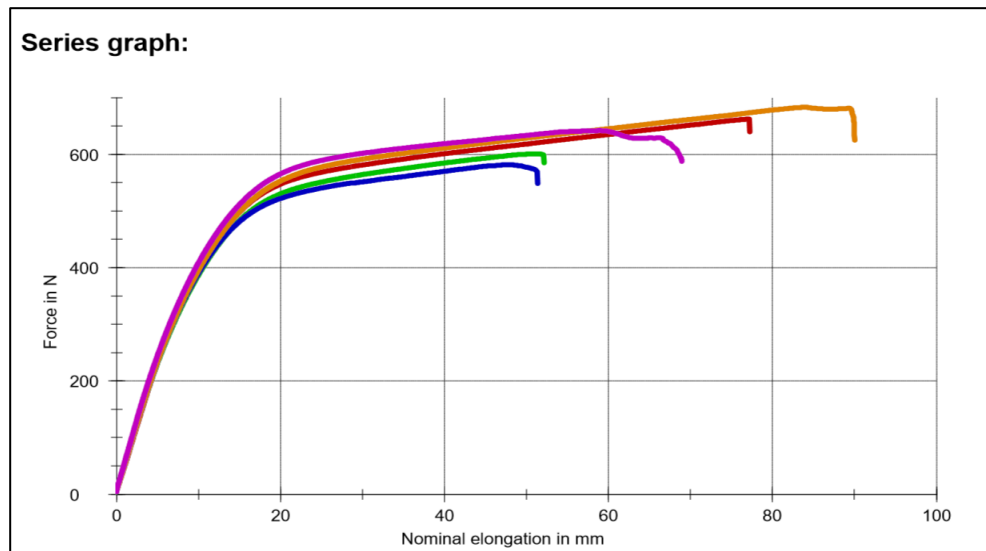


Gambar 4.20. hasil uji Tarik spesimen eksperimen konfirmasi

Berdasarkan gambar 4.20. hasil pengujian Tarik pada specimen eksperimen konfirmasi menunjukkan hasil yang lebih baik. Terlihat letak potongan atau patahan pengujian Tarik untuk semua replikasi berada didalam garis *length* dan posisinya cenderung sama sehingga hal tersebut dianggap proses pengujian Tarik berhasil dan sesuai dengan harapan. Berikut adalah data hasil pengujian Tarik yang ditunjukkan pada table 4.23, dan grafik kurva  $F_{max}$  pengujian Tarik yang ditunjukkan pada gambar 4.21.

Table 4.23. hasil pengujian Tarik eksperimen konfirmasi

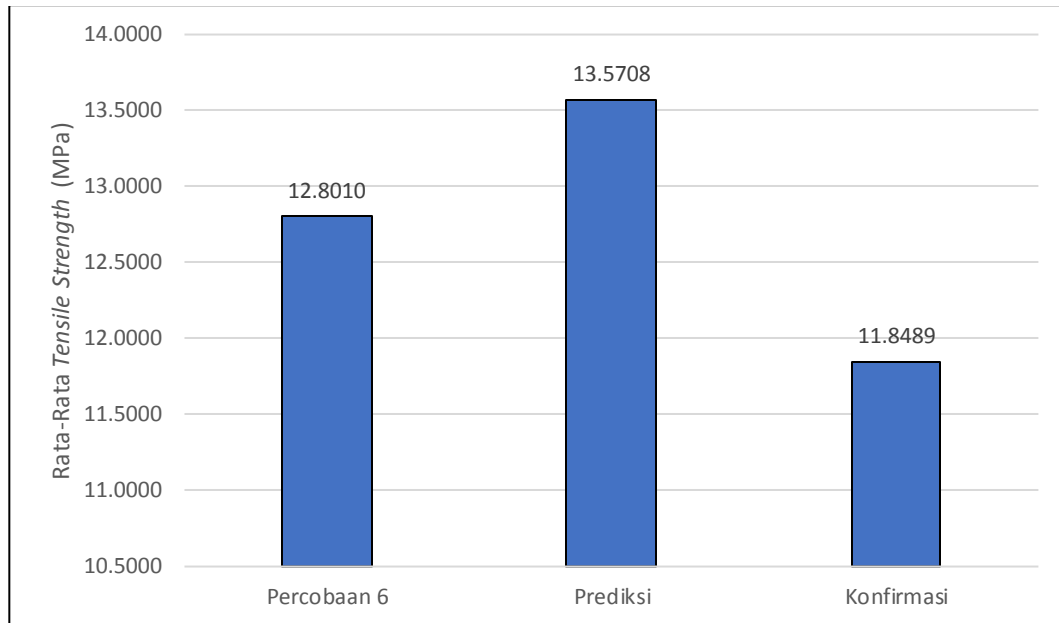
Replikasi	LO (mm)	WO (mm)	w (mm)	T (mm)	Massa (gram)	$F_{max}$ (N)	<i>Tensile Strength</i> (MPa)	Rata-rata (MPa)	Standar Deviasi
1	165,16	19,36	13,45	4,08	12,421	662,11	12,0655	11,8489	0.60661
2	165,38	19,26	13,33	4,16	12,358	683,05	12,3176		
3	165,72	19,18	13,31	4,32	12,087	641,91	11,1638		



Gambar 4.21. kurva Fmax spesimen eksperimen konfirmasi

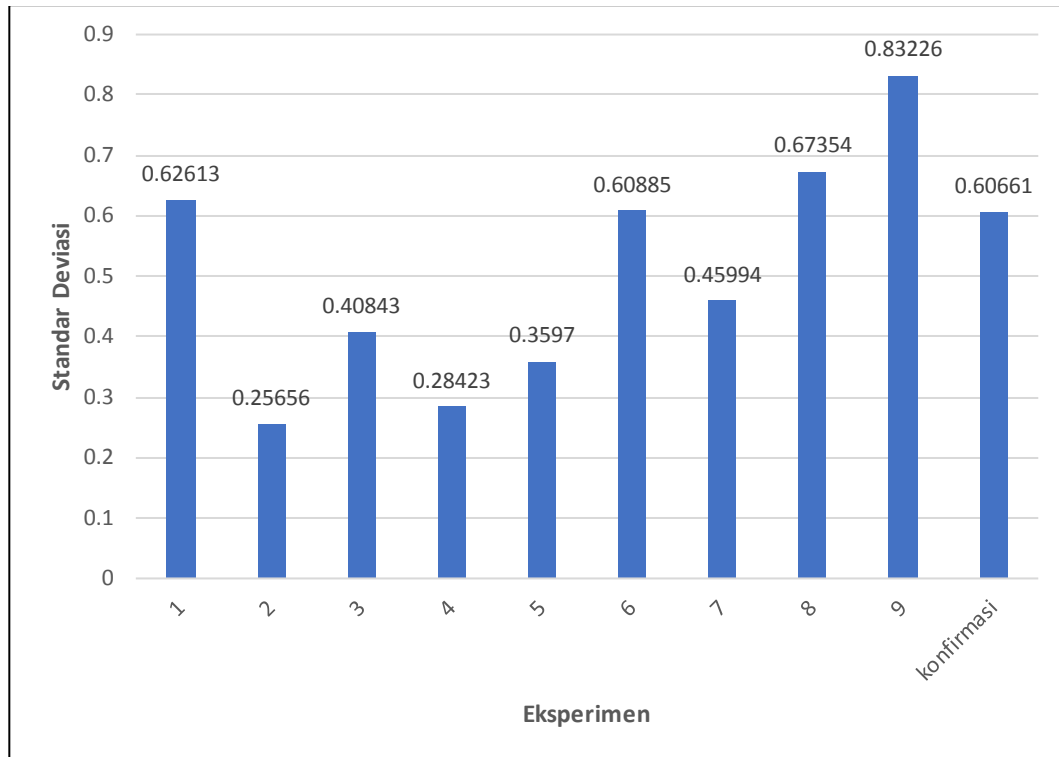
Berdasarkan gambar 4.21. grafik kurva Fmax diatas menunjukkan bentuk yang sama seperti pada percobaan sebelumnya. Pada awalnya garis Fmax berada dititik nol yang artinya belum terjadi pembebanan, kemudian terjadi kenaikan nilai Fmax yang secara Bersamaan diikuti dengan penambahan nilai perpanjangannya (regangan). Kenaikan garis tersebut terjadi karena diberikan pembebanan namun belum mencapai titik maksimal sehingga hanya membentuk kurva Fmax. Selanjutnya garis Fmax akan mencapai titik maksimalnya yang ditandai dengan perpatahan benda uji.

Berdasarkan data pada table 4.23 hasil pengujian Tarik eksperimen konfirmasi menunjukkan nilai tegangan Tarik terendah dihasilkan spasimen replikasi ke 3 yaitu sebesar 11,1638 MPa sedangkan nilai tegangan Tarik tertinggi dihasilkan spasimen replikasi ke 2 yaitu sebesar 12,3176 MPa dan rata-rata nilai tegangan Tarik keseluruhan yaitu sebesar 11,8489 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai tegangan Tarik specimen eksperimen konfirmasi telah memenuhi syarat tingkat kepercayaan sebesar 95% dimana hasilnya kurang dari nilai prediksi dan berada didalam kisaran interval kepercayaan (  $11,4103 \text{ MPa} \leq 13,5708 \text{ MPa} \leq 15,7313 \text{ MPa}$ ). Berikut ini merupakan perbandingan rata-rata nilai tegangan Tarik tertinggi yaitu percobaan ke 6, prediksi rata-rata nilai tegangan Tarik ( $\mu$ ) dan tegangan Tarik eksperimen konfirmasi yang disajikan pada diagram batang pada gambar 4.22.



Gambar 4.22. diagram batang perbandingan nilai tegangan Tarik

Berdasarkan gambar 4.22. diagram batang diatas menunjukkan nilai rata-rata tegangan Tarik pada percobaan ke 6 hampir mendekati nilai prediksi rata-rata, sedangkan nilai tegangan tarik eksperimen konfirmasi melebihi nilai percobaan ke 4 dan kurang dari nilai prediksi rata-rata. Dari hasil tersebut membuktikan bahwa kombinasi level parameter eksperimen konfirmasi merupakan level parameter yang paling optimal untuk respon kekuatan Tarik tertinggi. Berikut ini merupakan perbandingan nilai standar deviasi dari rata-rata tegangan Tarik pada Sembilan percobaan dan eksperimen konfirmasi yang ditunjukkan pada diagram batang gambar 4.23.



Gambar 4.23. diagram batang perbandingan nilai standar deviasi

Berdasarkan Gambar 4.23 diagram batang perbandingan nilai standar deviasi diatas menunjukkan bahwa nilai standar deviasi dari Sembilan percobaan memiliki data yang bervariasi dengan nilai standar deviasi terkecil dihasilkan oleh percobaan kedua. Nilai standar deviasi eksperimen konfirmasi lebih besar dibandingkan dengan percobaan kedua hal ini disebabkan eksperimen konfirmasi memiliki dimensi, nilai *tensile strength*, dan hasil patahan yang bervariasi. Namun jika dibandingkan dengan nilai *tensile strength*, hasil eksperimen konfirmasi lebih besar dibandingkan dengan percobaan kedua sehingga optimasi parameter yang dilakukan menggunakan metode taguchi terbukti dapat meningkatkan kualitas produk untuk nilai kekuatan tariknya. Selain itu kombinasi level parameter eksperimen konfirmasi juga dapat digunakan untuk mendesain sebuah produk yang ringan dan hemat material, karena hasil cetakan tidak terisi sepenuhnya dengan material.