

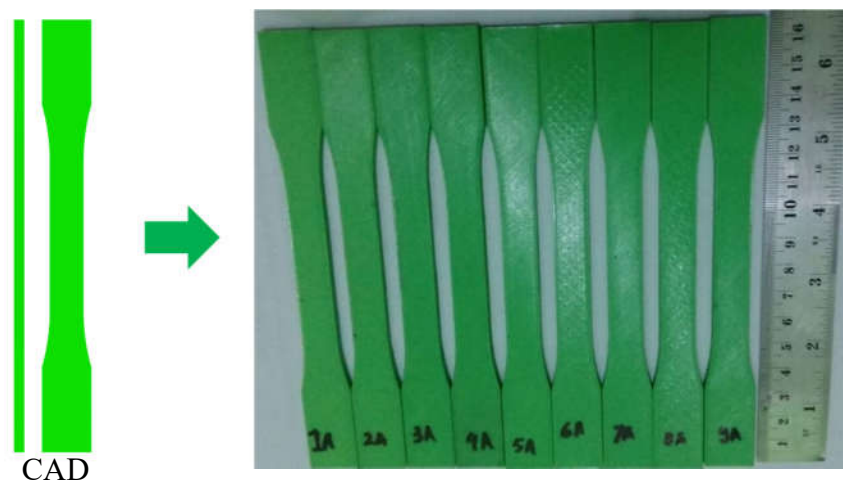
## BAB IV HASIL DAN ANALISIS PENELITIAN

### 4.1. Hasil Penelitian

Penelitian ini menghasilkan 27 spesimen ASTM D638 tipe I dari 9 percobaan dengan 3 replikasi untuk setiap percobaannya yang dicetak menggunakan 3D *printing*. Selanjutnya dilakukan pengambilan data pada spesimen meliputi massa, waktu proses, dimensi produk dan pengujian tarik. Tabel desain eksperimen (DOE) ditunjukkan pada tabel 4.1 dan hasil pencetakan ditunjukkan pada gambar 4.1.

Tabel 4.1. Desain eksperimen

| Percobaan | Parameter Proses              |                             |                           |                       |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
|           | <i>Nozzle Temperature (C)</i> | <i>Extrusion width (mm)</i> | <i>Infill Density (%)</i> | <i>Infill Pattern</i> |
| 1         | 205                           | 0.30                        | 25                        | <i>honeycomb</i>      |
| 2         | 205                           | 0.35                        | 2                         | <i>grid</i>           |
| 3         | 205                           | 0.40                        | 3                         | <i>triangles</i>      |
| 4         | 210                           | 0.30                        | 2                         | <i>triangles</i>      |
| 5         | 210                           | 0.35                        | 3                         | <i>honeycomb</i>      |
| 6         | 210                           | 0.40                        | 1                         | <i>grid</i>           |
| 7         | 215                           | 0.30                        | 3                         | <i>grid</i>           |
| 8         | 215                           | 0.35                        | 1                         | <i>triangles</i>      |
| 9         | 215                           | 0.40                        | 2                         | <i>honeycomb</i>      |



Gambar 4.1. Sampel hasil 3D *printing*.

#### 4.1.1. Massa dan Waktu Proses

Berdasarkan hasil penimbangan dan pencatatan waktu proses didapat data nilai rata-rata massa dan waktu proses dari 27 spesimen. Pada tabel rata-rata massa, tiga urutan nilai tertinggi adalah pada percobaan 3, 5 dan 7. Pada waktu proses nilai tertinggi terdapat pada percobaan 4 dan 7. Tabel rata-rata waktu proses ditunjukkan pada tabel 4.2.

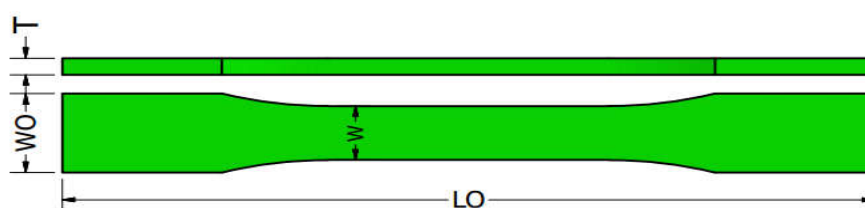
Tabel 4.2. Rata-rata Massa dan Waktu Proses

| Percobaan | Rata-Rata Massa (gr) | Waktu (menit) |
|-----------|----------------------|---------------|
| 1         | 6.75                 | 79.70         |
| 2         | 8.10                 | 77.30         |
| 3         | 9.18                 | 79.30         |
| 4         | 8.78                 | 91.85         |
| 5         | 10.56                | 91.82         |
| 6         | 6.71                 | 58.10         |
| 7         | 11.08                | 104.75        |
| 8         | 7.00                 | 66.67         |
| 9         | 8.54                 | 71.70         |

Berdasarkan tabel 4.1 menunjukkan bahwa kombinasi parameter proses *infill density* dan *extrusion width* mempengaruhi nilai masa dan waktu proses. *Infill density* yang semakin besar akan meningkatkan massa dari produk dimana dapat dilihat pada hasil percobaan 3, 5 dan 7 yang menggunakan level 3 (75%). 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. Pada *extrusion width* nilai yang semakin kecil membutuhkan waktu proses yang semakin lama. Pada hasil percobaan 7 menunjukkan nilai tertinggi untuk waktu proses dimana menggunakan parameter proses *extrusion width* level 1 (0.3 mm) dan terkecil pada hasil percobaan 8 yang menggunakan level 3 (0.4 mm). Pada *extrusion width* yang kecil memiliki lintasan (*line*) untuk ekstrusi bahan yang lebih panjang.

#### 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. 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.



keterangan:

LO : 165 mm (*no max*)

WO : 19 mm (+6.4)

w : 13 mm ( $\pm 0.5$ )

T : 4 mm ( $\pm 0.4$ )

Gambar 4.2. Panduan pengukuran spesimen

Tabel 4.3 Data hasil pengukuran dimensi produk

| Percobaan | Length Overall (LO) |        |        | Width Overall (WO) |       |       | Width (w) |       |       | Thickness (T) |      |      |
|-----------|---------------------|--------|--------|--------------------|-------|-------|-----------|-------|-------|---------------|------|------|
|           | R1                  | R2     | R3     | R1                 | R2    | R3    | R1        | R2    | R3    | R1            | R2   | R3   |
| 1         | 165.33              | 165.47 | 165.43 | 19.10              | 19.15 | 19.15 | 13.02     | 13.07 | 13.02 | 3.93          | 3.97 | 3.97 |
| 2         | 165.02              | 165.20 | 165.28 | 19.03              | 19.03 | 18.95 | 13.17     | 13.07 | 13.13 | 3.87          | 3.80 | 3.80 |
| 3         | 165.28              | 165.28 | 165.38 | 19.03              | 19.08 | 19.08 | 13.17     | 13.17 | 13.08 | 4.00          | 3.93 | 4.00 |
| 4         | 165.13              | 165.28 | 165.17 | 19.13              | 19.15 | 19.15 | 13.02     | 13.03 | 13.05 | 3.93          | 4.00 | 3.93 |
| 5         | 165.30              | 165.22 | 165.23 | 19.03              | 19.10 | 19.05 | 13.05     | 13.07 | 13.05 | 3.93          | 3.90 | 3.83 |
| 6         | 165.30              | 165.38 | 165.23 | 19.03              | 19.05 | 19.03 | 13.02     | 13.03 | 13.03 | 4.03          | 4.10 | 4.03 |
| 7         | 165.12              | 165.13 | 165.13 | 19.00              | 19.13 | 19.05 | 13.00     | 13.07 | 13.03 | 3.80          | 3.87 | 3.80 |
| 8         | 165.07              | 165.13 | 165.07 | 18.90              | 18.80 | 18.80 | 13.00     | 12.97 | 13.00 | 3.80          | 3.93 | 3.87 |
| 9         | 165.15              | 165.17 | 165.13 | 18.80              | 18.90 | 18.85 | 12.97     | 12.97 | 12.93 | 3.97          | 3.90 | 3.90 |

#### 4.1.3. Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan menggunakan metode ASTM dengan menggunakan kecepatan pengujian sebesar 5 mm/menit. Spesimen setelah proses pengujian ditunjukkan pada gambar 4.3 untuk R1, gambar 4.4 untuk R2, dan gambar 4.5 untuk R3.



Gambar 4.3. Spesimen R1



Gambar 4.4. Spesimen R2

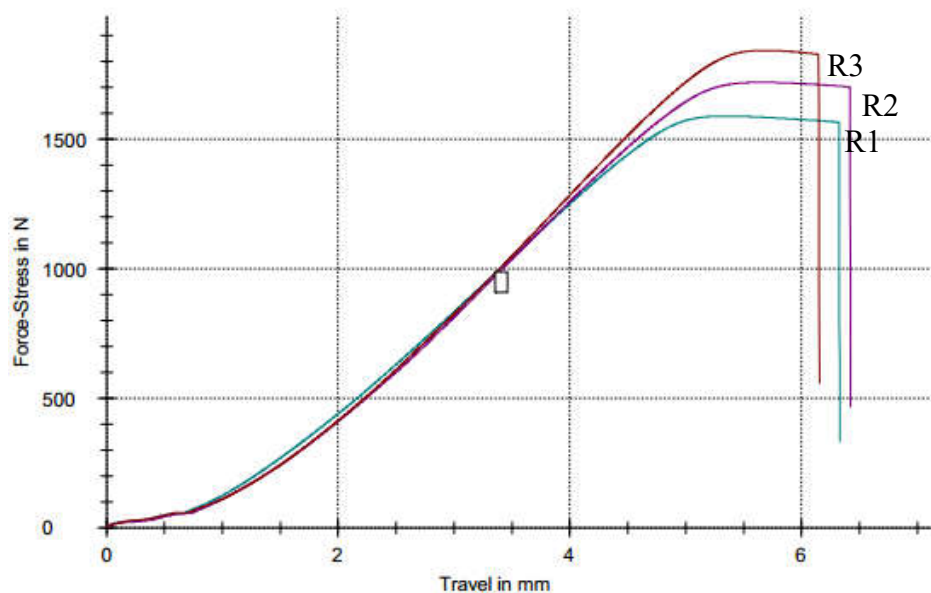


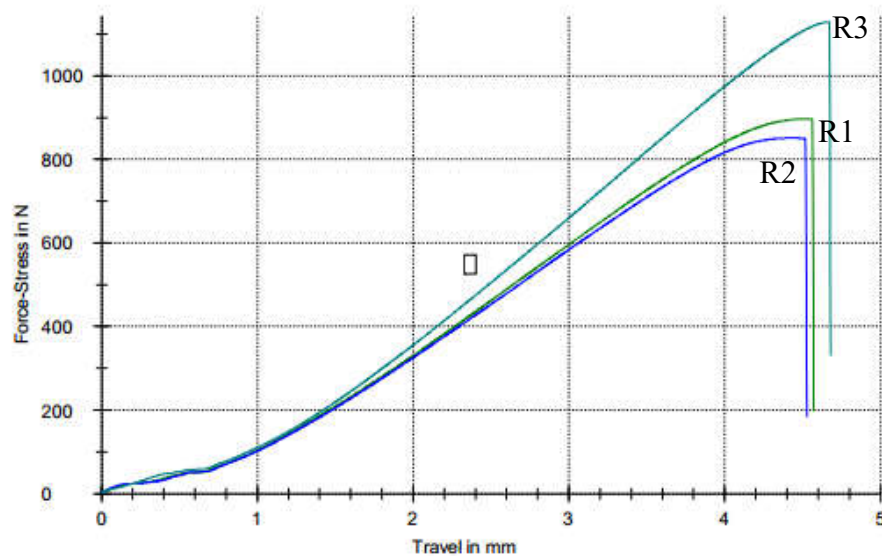
Gambar 4.5. Spesimen R3

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 5-R3 ditunjukkan pada gambar 4.6 dan  $F_{max}$  terkecil terdapat pada percobaan 6-R2 ditunjukkan pada gambar 4.7. Tabel nilai  $F_{max}$  ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4. Nilai  $F_{max}$ 

| No | $F_{max}$ (kgf) |        |        |
|----|-----------------|--------|--------|
|    | R1              | R2     | R3     |
| 1  | 89.60           | 114.88 | 109.66 |
| 2  | 95.61           | 111.21 | 108.25 |
| 3  | 141.15          | 115.60 | 91.24  |
| 4  | 123.46          | 124.16 | 109.01 |
| 5  | 162.11          | 175.42 | 187.99 |
| 6  | 91.51           | 86.80  | 115.12 |
| 7  | 135.03          | 164.15 | 166.82 |
| 8  | 108.86          | 106.56 | 111.05 |
| 9  | 143.21          | 123.89 | 123.85 |

Gambar 4.6. Kurva  $F_{max}$  percobaan 5



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

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 spesimen putus. Hal tersebut terjadi karena pada saat proses pembebanan awal, beban yang diberikan belum mencapai titik maksimal sehingga yang terbentuk 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 5 dan 6 adalah sebagai berikut:

Diketahui:

$$F_{5R3} = 187.991 \text{ kgf} = 1843.86 \text{ N}$$

$$F_{6R2} = 86.802 \text{ kgf} = 851.24 \text{ N}$$

$$W_{5R3} = 13.05 \text{ mm}$$

$$W_{6R2} = 13.03 \text{ mm}$$

$$T_{5R3} = 3.83 \text{ mm}$$

$$T_{6R2} = 4.03 \text{ mm}$$

Ditanya:

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

Penyelesaian:

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

$$\sigma_{5R3} = \frac{1843.86 \text{ N}}{13.05 \text{ mm} \times 3.83 \text{ mm}} = 36.85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{6R2} = \frac{86.802 N}{13.03 mm \times 4.03 mm} = 15.93 \text{ MPa}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan tegangan tarik terhadap semua percobaan. Data hasil perhitungan untuk *tensile strength* ditunjukkan pada tabel 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         | 17.16                         | 21.73 | 20.83 | 19.91           | 2.42            |
| 2         | 18.42                         | 21.96 | 21.27 | 20.55           | 1.88            |
| 3         | 26.28                         | 21.89 | 17.10 | 21.76           | 4.59            |
| 4         | 23.65                         | 23.35 | 20.83 | 22.61           | 1.55            |
| 5         | 30.97                         | 33.76 | 36.85 | 33.86           | 2.94            |
| 6         | 17.09                         | 15.93 | 21.48 | 18.17           | 2.92            |
| 7         | 26.80                         | 31.86 | 33.03 | 30.57           | 3.31            |
| 8         | 21.61                         | 20.49 | 21.67 | 21.26           | 0.66            |
| 9         | 27.31                         | 24.03 | 24.08 | 25.14           | 1.88            |

## 4.2. Analisis SNR dan ANOVA

Data yang telah didapat yaitu nilai dimensi produk dan *tensile strength* selanjutnya dilakukan analisis menggunakan *signal to noise ratio* (SNR) dan analisis varians (ANOVA).

### 4.2.1. *Signal to Noise Ratio*

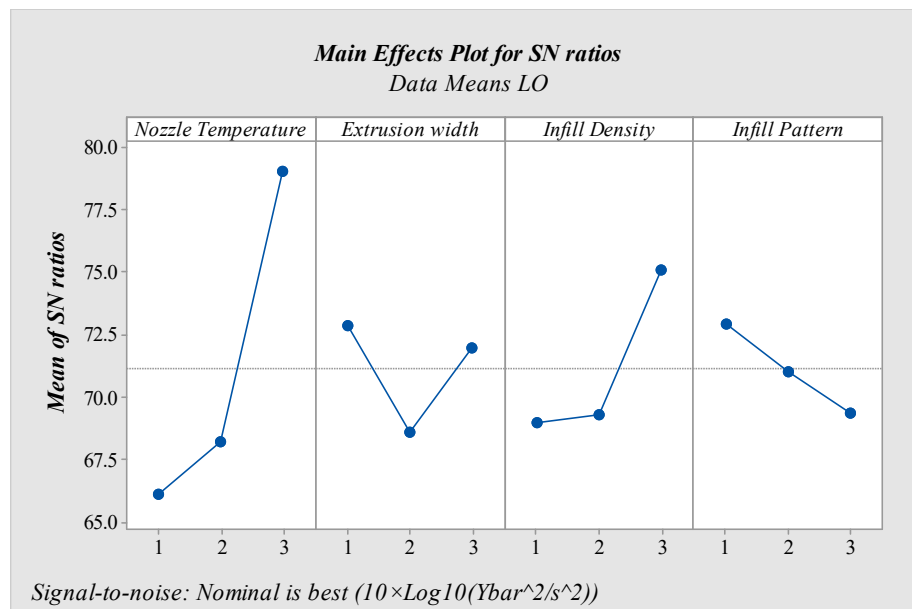
Tiga hasil replikasi yaitu R1, R2, dan R3 dari setiap percobaan digunakan untuk menghitung *signal to noise ratio* atau SNR. Penelitian ini menggunakan *software* Minitab 2017 untuk menghitung nilai SNR. Penggunaan SNR bertujuan untuk mengetahui level faktor atau parameter proses yang berpengaruh terhadap hasil respon (Soejanto, 2009: 28). Perhitungan SNR dilakukan berdasarkan target yang dituju pada penelitian ini dengan analisis menggunakan *software* Minitab 2017. Selanjutnya level parameter proses yang diurutkan dari yang paling berpengaruh dan disajikan dalam tabel respon dan grafik *main effect*.

Parameter respon dimensi produk dilakukan analisis menggunakan metode SNR *nominal is the best* (NTB) atau tertuju pada nilai tertentu. Nilai target dari SNR NTB adalah tidak nol dan nilainya terbatas. Dalam tahap ini dilakukan

pemilihan level yang meminimalkan gangguan yaitu memilih level dengan nilai SNR tertinggi.

Tabel 4.6. Respon dimensi LO

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Infill Density</i> | <i>Infill Pattern</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1            | 66.11                     | 72.89                  | 69.01                 | 72.98                 |
| 2            | 68.25                     | 68.59                  | 69.34                 | 71.07                 |
| 3            | 79.09                     | 71.97                  | 75.10                 | 69.41                 |
| <i>Delta</i> | 12.98                     | 4.30                   | 6.09                  | 3.57                  |
| <i>Rank</i>  | 1                         | 3                      | 2                     | 4                     |



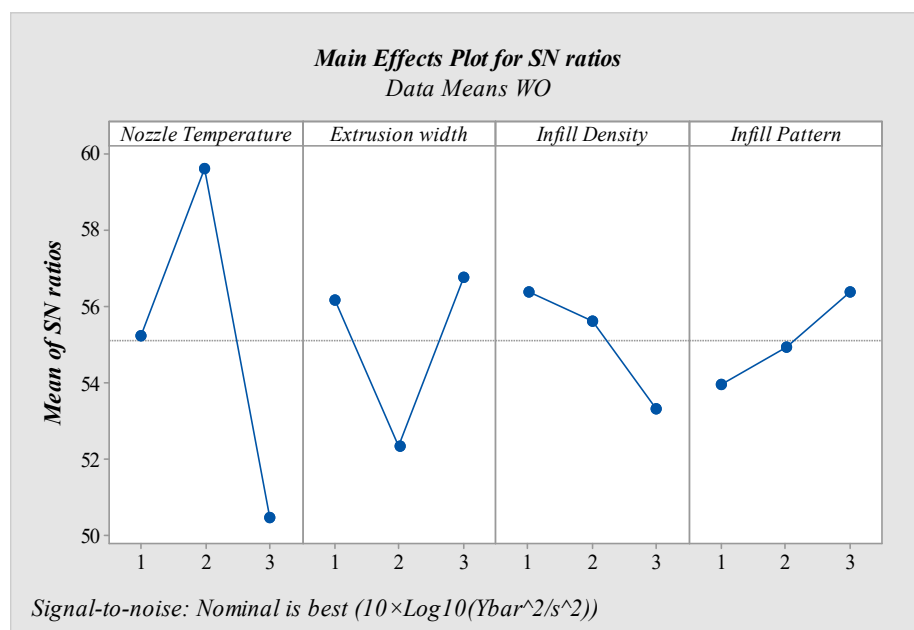
Gambar 4.8. Grafik *main effect plot* untuk SNR dimensi LO

Berdasarkan tabel 4.6 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 3 (215 °C), *extrusion width* level 1 (0.3 mm), *infill density* level 3 (75%), dan *infill pattern* level 1 (*honeycomb*). Grafik pengaruh parameter proses terhadap variabel respon yang merata pada tingkat parameter proses lain untuk dimensi LO yang ditunjukkan pada gambar 4.8. Parameter proses *nozzle temperature* pada level 3 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 79.09.



Tabel 4.7. Respon SNR dimensi WO

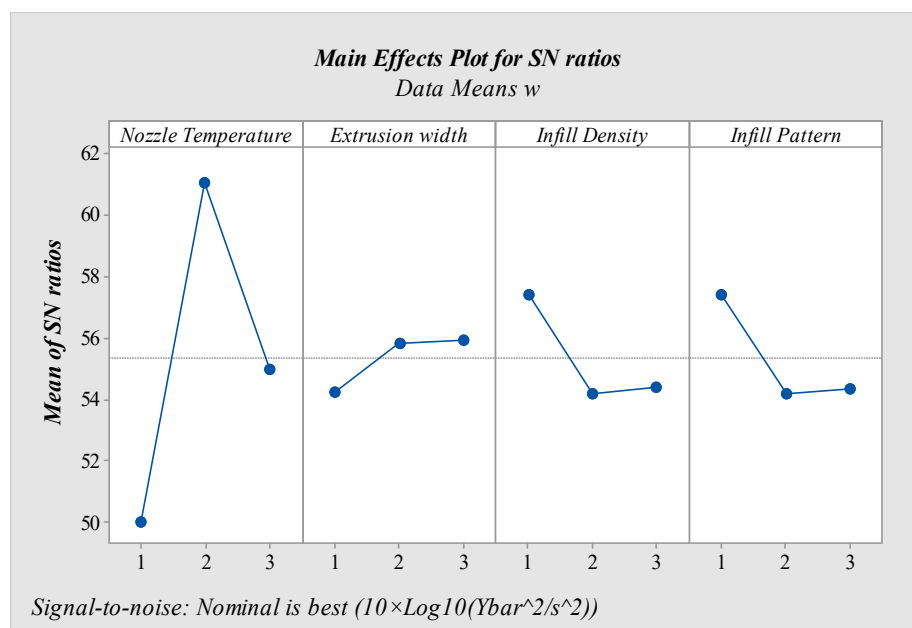
| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Infill Density</i> | <i>Infill Pattern</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1            | 55.22                     | 56.17                  | 56.37                 | 53.97                 |
| 2            | 59.61                     | 52.36                  | 55.61                 | 54.96                 |
| 3            | 50.47                     | 56.77                  | 53.33                 | 56.37                 |
| <i>Delta</i> | 9.14                      | 3.81                   | 3.04                  | 2.40                  |
| <i>Rank</i>  | 1                         | 2                      | 3                     | 4                     |

Gambar 4.9. Grafik *main effect plot* untuk SNR dimensi WO

Berdasarkan tabel 4.7 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 2 (210 °C), *extrusion width* level 3 (0.4 mm), *infill density* level 1 (25%), dan *infill pattern* level 3 (*triangles*). Grafik pengaruh parameter proses terhadap variabel respon yang merata pada tingkat parameter proses lain untuk dimensi WO yang ditunjukkan pada gambar 4.9. Parameter proses *nozzle temperature* pada level 2 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 59.61.

Tabel 4.8. Respon SNR dimensi w

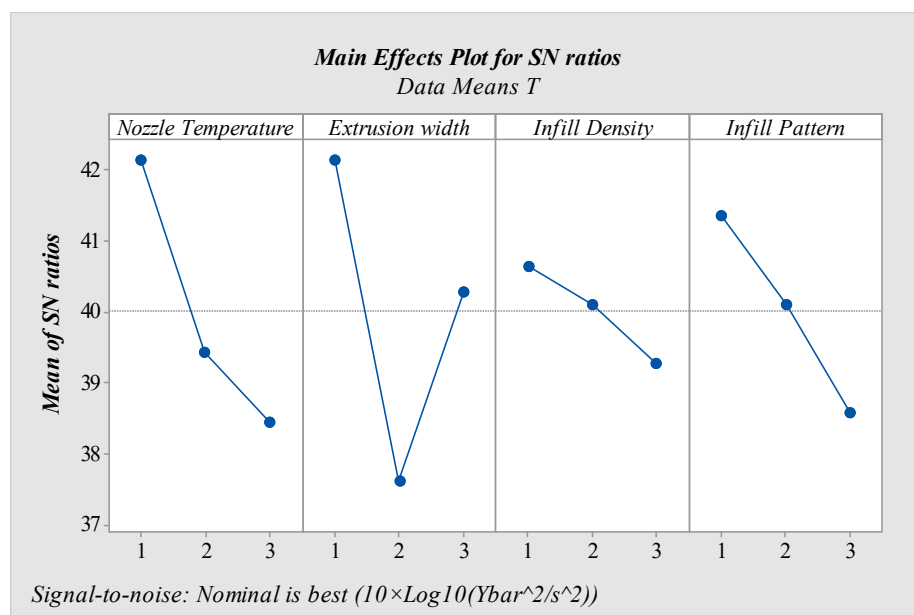
| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Infill Density</i> | <i>Infill Pattern</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1            | 50.01                     | 54.27                  | 57.44                 | 57.44                 |
| 2            | 61.05                     | 55.82                  | 54.22                 | 54.23                 |
| 3            | 55.00                     | 55.97                  | 54.41                 | 54.39                 |
| <i>Delta</i> | 11.04                     | 1.70                   | 3.22                  | 3.21                  |
| <i>Rank</i>  | 1                         | 4                      | 2                     | 3                     |

Gambar 4.10. Grafik *main effect plot* untuk SNR dimensi w

Berdasarkan tabel 4.8 telah didapat respon dimensi w dari pengacakan level pada masing-masing parameter proses dengan melihat nilai *noise* terbesar. Pada respon SNR untuk dimensi w level paling optimum adalah *nozzle temperature* level 2 (210 °C), *extrusion width* level 3 (0.4 mm), *infill density* level 1 (25%), dan *infill pattern* level 1 (*honeycomb*). Grafik pengaruh parameter proses terhadap variabel respon yang merata pada tingkat parameter proses lain untuk dimensi w yang ditunjukkan pada gambar 4.10. Parameter proses *nozzle temperature* pada level 2 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 61.05.

Tabel 4.9. Respon SNR dimensi T

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Infill Density</i> | <i>Infill Pattern</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1            | 42.16                     | 42.14                  | 40.66                 | 41.36                 |
| 2            | 39.45                     | 37.62                  | 40.11                 | 40.11                 |
| 3            | 38.46                     | 40.30                  | 39.29                 | 38.60                 |
| <i>Delta</i> | 3.70                      | 4.52                   | 1.37                  | 2.76                  |
| <i>Rank</i>  | 2                         | 1                      | 4                     | 3                     |

Gambar 4.11. Grafik *main effect plot* untuk SNR dimensi T

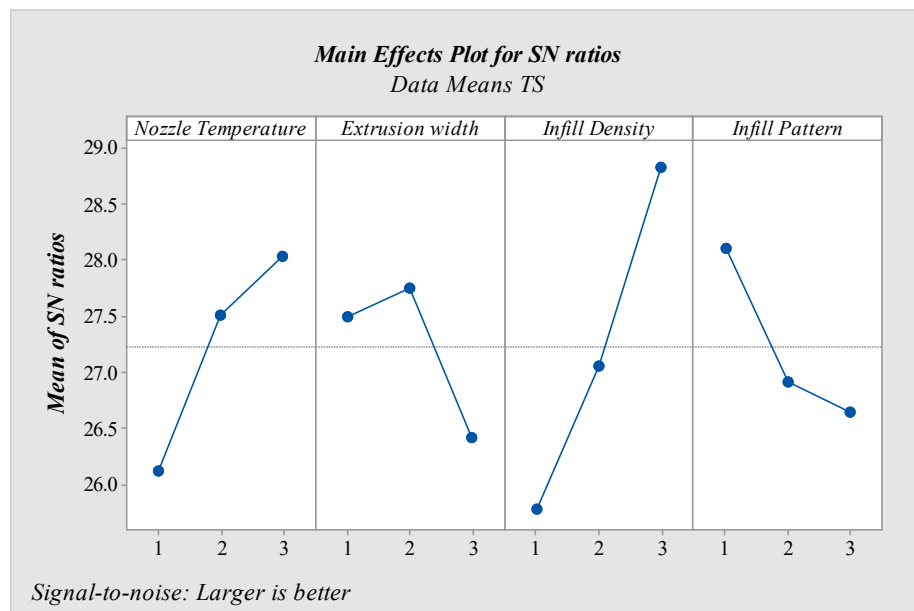
Berdasarkan tabel 4.9 telah didapat respon dimensi T dari pengacakan level pada masing-masing parameter proses dengan melihat nilai *noise* terbesar. Pada respon SNR untuk dimensi T level paling optimum adalah *nozzle temperature* level 1 (205 °C), *extrusion width* level 1 (0.3 mm), *infill density* level 1 (25%), dan *infill pattern* level 1 (*honeycomb*). Grafik pengaruh parameter proses terhadap variabel respon yang merata pada tingkat parameter proses lain untuk dimensi T yang ditunjukkan pada gambar 4.11. Parameter proses *nozzle temperature* pada level 1 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 42.16.

Pada hasil nilai *tensile strength* (TS) atau tegangan tarik dilakukan analisis menggunakan metode SNR *larger the better* (LTB) atau semakin besar semakin

baik. Karakteristik kualitas pada SNR LTB adalah kontinyu, non-negatif dan mengambil nilai dari nol sampai tak terhingga. Nilai targetnya tidak nol dan idealnya sebesar mungkin.

Tabel 4.10. Respon SNR dimensi TS

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Infill Density</i> | <i>Infill Pattern</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1            | 26.12                     | 27.49                  | 25.79                 | 28.11                 |
| 2            | 27.52                     | 27.75                  | 27.06                 | 26.92                 |
| 3            | 28.03                     | 26.43                  | 28.82                 | 26.64                 |
| <i>Delta</i> | 1.91                      | 1.32                   | 3.03                  | 1.47                  |
| <i>Rank</i>  | 2                         | 4                      | 1                     | 3                     |



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

Berdasarkan tabel 4.10 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 level paling optimum adalah *nozzle temperature* level 3 (215 °C), *extrusion width* level 2 (0.35 mm), *infill density* level 3 (75%), dan *infill pattern* level 1 (*honeycomb*). Grafik pengaruh parameter proses terhadap variabel respon yang merata pada tingkat parameter proses lainnya untuk nilai TS yang ditunjukkan pada gambar 4.12. Parameter proses *infill density* pada level 3 memiliki grafik nilai SNR tertinggi sebesar 28.82.

Tabel respon menjelaskan level optimum dan tingkat pengaruh pada parameter proses terhadap variabel respon. Tabel respon berdasarkan nilai SNR menunjukkan hasil yang berbeda terhadap respon variabel yang berbeda. Tabel respon menunjukkan tingkat pengaruh dengan melihat nilai selisih terbesar atau *delta* antara level satu sampai tiga. Seperti pada grafik respon dimensi T (gambar 4.9) menunjukkan parameter *nozzle temperature* memiliki nilai SNR tertinggi yaitu 42.16, namun pada tabel respon dimensi T (tabel 4.9) berada pada urutan ke 2 dari semua parameter proses yang digunakan, nilai terbesar terdapat pada parameter *extrusion width* sebesar 4.52. Hal ini terjadi karena pengaruh pengacakan level dilihat dari nilai *delta* atau selisih terbesar dari level satu sampai tiga dimana pada respon dimensi T parameter proses *nozzle temperature* memiliki nilai yang lebih kecil. Sehingga pada tabel respon semakin besar nilai *delta* berarti semakin besar pengaruh pengacakan level pada parameter proses. Hal ini akan berlaku pada semua variabel respon yang ada pada penelitian ini.

Dengan analisis SNR ini telah diketahui level dari parameter proses mana yang paling berpengaruh pada 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 analisis varians.

#### **4.2.2. Analysis of Variance**

Analisis varians atau ANOVA digunakan untuk mengetahui kontribusi setiap parameter proses dengan melakukan pengklasifikasian hasil-hasil percobaan secara statistik sesuai sumber-sumber varians. Ada beberapa klasifikasi yang dihitung pada analisis ANOVA meliputi ST,  $Mq$ ,  $Sq_A$  (setiap faktor),  $S_e$ , *F-ratio*,  $Df$ ,  $Sq'$ , *P-value*, dan  $\rho\%$ . 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 mengklasifikasi sebagai faktor penting (F) dan faktor signifikan (P). Perhitungan ANOVA pada hasil dimensi LO adalah sebagai berikut:

Keterangan:

A : *Nozzle Temperature*

B : *Extrusion Width*

C : *Infill Density*

D : *Infill Pattern*

e : *Error*

T : Jumlah total

N : Jumlah eksperimen

n : Jumlah eksperimen pada faktor

1. Jumlah Kuadrat Total Data (ST)

$$\begin{aligned}
 ST &= \sum y^2 \\
 &= 165.33^2 + 165.02^2 + 165.28^2 + 165.13^2 + 165.30^2 + 165.30^2 + 165.12^2 + \\
 &\quad 165.07^2 + 165.15^2 + 165.47^2 + 165.20^2 + 165.28^2 + 165.28^2 + 165.22^2 + \\
 &\quad 165.38^2 + 165.13^2 + 165.13^2 + 165.17^2 + 165.43^2 + 165.28^2 + 165.38^2 + \\
 &\quad 165.17^2 + 165.23^2 + 165.23^2 + 165.13^2 + 165.07^2 + 165.13^2 \\
 ST &= 737067.70
 \end{aligned}$$

2. Jumlah Kuadrat Mean (Sm)

$$\begin{aligned}
 Sm &= n \times \bar{y}^2 \\
 &= 27 \times 165.22^2 = 737067.35
 \end{aligned}$$

3. Jumlah Derajat Kebebasan (Df, Df<sub>e</sub>)

$$\begin{aligned}
 Df &= level - 1 \\
 &= 3 - 1 = 2 \\
 Df_e &= VoA - \sum Df \\
 &= N - 1 - \sum Df \\
 &= 27 - 1 - 8 = 18
 \end{aligned}$$

4. Jumlah Kuadrat Faktor (Sq<sub>A</sub>, Sq<sub>B</sub>, Sq<sub>C</sub>, Sq<sub>D</sub>, Sq<sub>e</sub>)

$$\begin{aligned}
 Sq_A &= \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_1^2}{n_{A1}} - \frac{T^2}{N} \\
 &= \frac{1487.68^2}{9} + \frac{1487.25^2}{9} + \frac{1486.10^2}{9} - \frac{44461.03^2}{27} = 0.149
 \end{aligned}$$

$$SqB = \frac{B_1^2}{n_{B1}} + \frac{B_1^2}{n_{B1}} + \frac{B_1^2}{n_{B1}} - \frac{T^2}{N}$$

$$= \frac{1487.20^2}{9} + \frac{1486.52^2}{9} + \frac{1487.32^2}{9} - \frac{4461.03^2}{27}$$

$$= 0.042$$

$$SqC = \frac{C_1^2}{n_{C1}} + \frac{C_1^2}{n_{C1}} + \frac{C_1^2}{n_{C1}} - \frac{T^2}{N}$$

$$= \frac{1487.42^2}{9} + \frac{1486.53^2}{9} + \frac{1487.08^2}{9} - \frac{4461.03^2}{27}$$

$$= 0.044$$

$$SqD = \frac{D_1^2}{n_{D1}} + \frac{D_1^2}{n_{D1}} + \frac{D_1^2}{n_{D1}} - \frac{T^2}{N}$$

$$= \frac{1487.43^2}{9} + \frac{1486.80^2}{9} + \frac{1486.80^2}{9} - \frac{4461.03^2}{27}$$

$$= 0.030$$

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

$$= 737067.70 - 737067.35 - 0.149 - 0.042 - 0.044 - 0.030$$

$$= 0.08$$

5. Jumlah Kuadrat Total Sesungguhnya (St)

$$St = SqA + SqB + SqC + SqD + Sqe$$

$$= 0.149 + 0.042 + 0.044 + 0.032 + 0.085 = 0.349$$

6. Rata-Rata Jumlah Kuadrat (Mq<sub>A</sub>, Mq<sub>B</sub>, Mq<sub>C</sub>, Mq<sub>D</sub>, Mq<sub>e</sub>)

$$MqA = \frac{SqA}{DfA}$$

$$= \frac{0.149}{2} = 0.074$$

$$MqB = \frac{SqB}{DfB}$$

$$= \frac{0.042}{2} = 0.021$$

$$MqC = \frac{SqC}{DfC}$$

$$= \frac{0.044}{2} = 0.022$$

$$MqD = \frac{SqD}{DfD}$$

$$= \frac{0.030}{2} = 0.015$$

$$Mqe = \frac{Sqe}{Dfe}$$

$$= \frac{0.085}{18} = 0.005$$

$$Mqt = \frac{St}{Dft}$$

$$= \frac{0.349}{26} = 0.013$$

7. Faktor Rasio (F-ratio)

$$F - ratio A = \frac{MqA}{Mqe}$$

$$= \frac{0.074}{0.005} = 15.79$$

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

$$= \frac{0.021}{0.005} = 4.40$$

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

$$= \frac{0.022}{0.005} = 4.69$$

$$F - ratio D = \frac{MqD}{Mqe}$$

$$= \frac{0.015}{0.005} = 3.15$$

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

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

$$= 0.149 - 2 \times 0.005 = 0.139$$

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



$$= 0.042 - 2 \times 0.005 = 0.032$$

$$\begin{aligned} SqC' &= SqC - Df \times Mqe \\ &= 0.044 - 2 \times 0.005 = 0.035 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SqD' &= SqD - Df \times Mqe \\ &= 0.030 - 2 \times 0.005 = 0.020 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sqe' &= St - SqA' - SqB' - SqC' - SqD' \\ &= 0.349 - 0.139 - 0.032 - 0.035 - 0.020 = 0.123 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \rho A &= \frac{SqA'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.139}{0.349} \times 100\% = 39.93\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho B &= \frac{SqB'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.032}{0.349} \times 100\% = 9.19\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho C &= \frac{SqC'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.035}{0.349} \times 100\% = 9.97\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho D &= \frac{SqD'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.020}{0.349} \times 100\% = 5.81\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho e &= \frac{Sqe'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.123}{0.349} \times 100\% = 35.10\% \end{aligned}$$

#### 10. Probability values (P)

Nilai P dicari menggunakan tabel distribusi F berdasarkan nilai *F-ratio*,  $Df_1$  ( $Df$  pada faktor),  $Df_2$  ( $Df$  error). Pada penelitian ini berdasarkan data F (15.79, 2, 18) menggunakan tabel distribusi F didapat nilai  $\alpha = P = 0.000$ .

Selanjutnya hasil perhitungan di atas diklasifikasikan dalam tabel ANOVA. Pada tabel ANOVA hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan tingkat

pengaruh pada parameter proses adalah nilai F, P dan  $\rho$ . Dengan nilai F yang tercantum dalam tabel ANOVA maka dapat dilakukan uji hipotesis atau uji F. Pada tabel ANOVA nilai F yang tercantum adalah nilai F -hitung. Untuk itu supaya dapat melakukan uji F maka diperlukan nilai F-tabel yang dicari menggunakan tabel distribusi F. Nilai F-tabel dicari berdasarkan nilai  $\alpha$  yang pada penelitian ini menggunakan  $\alpha$ : 0.05 (5%), nilai derajat kebebasan faktor (Df) dan derajat kebebasan *error*. Karena pada penelitian ini semua faktor memiliki Df sebesar 2 maka nilai F tabel untuk semua faktor sama. Nilai F tabel dengan F (0.5, 2, 18) adalah 3.55. Selanjutnya dilakukan uji F, apabila F-hitung memiliki nilai lebih kecil dari F-tabel ( $F_{hitung} < F_{tabel}$ ), maka hipotesis ( $H_0$ ) diterima yang berarti tidak ada pengaruh perlakuan pada faktor. Namun jika nilai F hitung lebih besar dari F tabel ( $F_{hitung} > F_{tabel}$ ), maka hipotesis ( $H_0$ ) ditolak atau ada pengaruh pada perbedaan perlakuan (Soejanto, 2009:27).

Besarnya nilai P digunakan untuk mengetahui tingkat signifikansi pada parameter proses atau faktor. Sesuai dengan nilai *critical significant* atau  $\alpha$  (*alpha error*), jika nilai P lebih kecil dari nilai  $\alpha$  (0.05) maka faktor tersebut signifikan dan sebaliknya jika P lebih besar maka faktor menjadi tidak signifikan. Selanjutnya nilai  $\rho$  menunjukkan tingkat kontribusi suatu faktor dalam persen. Semakin besar nilai  $\rho$  maka semakin besar kontribusi faktor tersebut terhadap suatu respon. Tabel ANOVA untuk LO ditunjukkan pada tabel 4.11.

Tabel 4.11. Persen kontribusi parameter untuk dimensi LO dengan ANOVA

| Source             | Sq        | Df | Mq    | F-ratio | Sq'   | P       | $\rho\%$ |
|--------------------|-----------|----|-------|---------|-------|---------|----------|
| Nozzle Temperature | 0.149     | 2  | 0.074 | 15.79   | 0.139 | 0.000** | 39.93    |
| Extrusion width    | 0.042     | 2  | 0.021 | 4.40    | 0.032 | 0.023*  | 9.19     |
| Infill Density     | 0.044     | 2  | 0.022 | 4.69    | 0.035 | 0.018*  | 9.97     |
| Infill Pattern     | 0.030     | 2  | 0.015 | 3.15    | 0.020 | 0.059   | 5.81     |
| e                  | 0.085     | 18 | 0.005 | 1.00    | 0.123 | -       | 35.10    |
| St                 | 0.349     | 26 | 0.013 | -       | 0.349 | -       | 100      |
| Mean               | 737067.35 | 2  | -     | -       | -     | -       | -        |
| ST                 | 737067.70 | 27 | -     | -       | -     | -       | -        |

Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat besar kontribusi dan pengaruh dari faktor terhadap respon dimensi panjang keseluruhan atau LO. Pada tabel tersebut nilai

faktor *nozzle temperature* memiliki tingkat kontribusi terbesar yaitu 39.93%. Untuk nilai P hanya pada faktor *infill pattern* yang tidak signifikan karena memiliki nilai 0.059 sehingga nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$ : 0.05. Untuk nilai F hanya  $H_0$  dari faktor *infill pattern* yang diterima artinya hanya faktor tersebut yang tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan.

Tabel 4.12. Persen kontribusi parameter untuk dimensi WO dengan ANOVA

| Source                    | Sq      | Df | Mq    | F-ratio | Sq'    | P       | $\rho\%$ |
|---------------------------|---------|----|-------|---------|--------|---------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 0.149   | 2  | 0.074 | 43.99   | 0.145  | 0.000** | 45.47    |
| <i>Extrusion width</i>    | 0.117   | 2  | 0.058 | 34.62   | 0.114  | 0.000** | 35.56    |
| <i>Infill Density</i>     | 0.021   | 2  | 0.011 | 6.34    | 0.018  | 0.008** | 5.65     |
| <i>Infill Pattern</i>     | 0.002   | 2  | 0.001 | 0.59    | -0.001 | 0.565   | -0.43    |
| <i>e</i>                  | 0.030   | 18 | 0.002 | 1.00    | 0.044  | -       | 13.75    |
| St                        | 0.319   | 26 | 0.012 | -       | 0.319  | -       | 100      |
| Mean                      | 9766.01 | 2  | -     | -       | -      | -       | -        |
| ST                        | 9766.33 | 27 | -     | -       | -      | -       | -        |

Berdasarkan tabel 4.12 dapat dilihat besar kontribusi dan pengaruh dari faktor terhadap respon dimensi lebar keseluruhan atau WO. Pada tabel tersebut nilai faktor dengan nilai kontribusi terbesar adalah *nozzle temperature* (45.47 %) dan *extrusion width* (35.56%). Untuk nilai P hanya pada faktor *infill pattern* yang tidak signifikan karena memiliki nilai 0.565 sehingga nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$ : 0.05. Untuk nilai F hanya  $H_0$  dari faktor *infill pattern* yang diterima artinya hanya faktor tersebut yang tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan.

Tabel 4.13. Persen kontribusi parameter untuk dimensi w dengan ANOVA

| Source                    | Sq      | Df | Mq    | F-ratio | Sq'   | P       | $\rho\%$ |
|---------------------------|---------|----|-------|---------|-------|---------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 0.050   | 2  | 0.025 | 28.15   | 0.049 | 0.000** | 50.49    |
| <i>Extrusion width</i>    | 0.002   | 2  | 0.001 | 1.29    | 0.001 | 0.300   | 0.53     |
| <i>Infill Density</i>     | 0.016   | 2  | 0.008 | 9.11    | 0.015 | 0.002** | 15.09    |
| <i>Infill Pattern</i>     | 0.011   | 2  | 0.006 | 6.22    | 0.009 | 0.009** | 9.71     |
| <i>e</i>                  | 0.016   | 18 | 0.001 | 1.00    | 0.023 | -       | 24.18    |
| St                        | 0.096   | 26 | 0.004 | -       | 0.096 | -       | 100      |
| Mean                      | 4593.38 | 2  | -     | -       | -     | -       | -        |
| ST                        | 4593.48 | 27 | -     | -       | -     | -       | -        |

Berdasarkan tabel 4.13 dapat dilihat besar kontribusi dan pengaruh dari faktor terhadap respon dimensi lebar tengah atau  $w$ . Pada tabel tersebut nilai faktor *nozzle temperature* memiliki tingkat kontribusi terbesar yaitu 50.49 %. Untuk nilai  $F$  hanya  $H_0$  dari faktor *extrusion width* yang diterima artinya pada faktor tersebut tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan. Untuk nilai  $P$  hanya pada faktor *extrusion width* yang tidak signifikan karena memiliki nilai 0.3 sehingga nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$ : 0.05.

Tabel 4.14. Persen kontribusi parameter untuk dimensi T dengan ANOVA

| Source                    | Sq     | Df | Mq    | F-ratio | Sq'   | P       | $\rho\%$ |
|---------------------------|--------|----|-------|---------|-------|---------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 0.042  | 2  | 0.021 | 11.52   | 0.038 | 0.001** | 21.89    |
| <i>Extrusion width</i>    | 0.072  | 2  | 0.036 | 19.91   | 0.068 | 0.000** | 39.34    |
| <i>Infill Density</i>     | 0.022  | 2  | 0.011 | 6.20    | 0.019 | 0.009** | 10.83    |
| <i>Infill Pattern</i>     | 0.005  | 2  | 0.003 | 1.43    | 0.002 | 0.265   | 0.90     |
| <i>e</i>                  | 0.033  | 18 | 0.002 | 1.00    | 0.047 | -       | 27.04    |
| St                        | 0.174  | 26 | 0.007 | -       | 0.174 | -       | 100      |
| Mean                      | 414.58 | 2  | -     | -       | -     | -       | -        |
| ST                        | 414.75 | 27 | -     | -       | -     | -       | -        |

Berdasarkan tabel 4.14 dapat dilihat besar kontribusi dan pengaruh dari faktor terhadap respon dimensi tebal atau  $T$ . Pada tabel tersebut nilai faktor *extrusion width* memiliki tingkat kontribusi terbesar yaitu 39.34 %. Untuk nilai  $F$  hanya  $H_0$  dari faktor *infill pattern* diterima yang artinya pada faktor tersebut tidak memiliki perbedaan pengaruh pada perlakuan yang dilakukan. Untuk nilai  $P$  hanya pada faktor *infill pattern* tidak signifikan karena memiliki nilai 0.265 sehingga nilainya lebih besar dari nilai  $\alpha$ : 0.05.

Tabel 4.15. Persen kontribusi parameter untuk nilai TS dengan ANOVA

| Source                    | Sq       | Df | Mq     | F-ratio | Sq'    | P       | $\rho\%$ |
|---------------------------|----------|----|--------|---------|--------|---------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 125.660  | 2  | 62.83  | 8.69    | 111.21 | 0.002** | 14.17    |
| <i>Extrusion width</i>    | 61.183   | 2  | 30.59  | 4.23    | 46.73  | 0.031*  | 5.95     |
| <i>Infill Density</i>     | 373.784  | 2  | 186.89 | 25.86   | 359.33 | 0.000** | 45.78    |
| <i>Infill Pattern</i>     | 94.154   | 2  | 47.08  | 6.51    | 79.70  | 0.007** | 10.15    |
| <i>e</i>                  | 130.073  | 18 | 7.23   | 1.00    | 187.88 | -       | 23.94    |
| St                        | 784.854  | 26 | 30.19  | -       | 784.85 | -       | 100      |
| Mean                      | 15238.22 | 2  | -      | -       | -      | -       | -        |
| ST                        | 16023.07 | 27 | -      | -       | -      | -       | -        |

Berdasarkan tabel 4.15 dapat dilihat besar kontribusi dan pengaruh dari faktor terhadap respon nilai tegangan tarik atau TS. Pada tabel tersebut nilai faktor *infill density* memiliki tingkat kontribusi terbesar yaitu 45.78 %. Untuk nilai F dan nilai P semua memiliki nilai yang masuk kriteria  $\alpha$ : 0.05, sehingga semua faktor memiliki pengaruh dan signifikan terhadap respon nilai TS.

### 4.3. Analisis Parameter Optimum

Berdasarkan analisis menggunakan nilai SNR dan identifikasi menggunakan ANOVA pada masing-masing hasil variabel respon dapat diketahui level dan parameter proses optimum. Untuk level optimum parameter proses berdasarkan SNR ditunjukkan pada tabel 4.16.

Tabel 4.16. Level parameter proses optimum berdasarkan SNR

| Respon                  | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Infill Density</i> | <i>Infill Pattern</i> |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Dimensi LO              | 215                       | 0.3                    | 75                    | <i>Honeycomb</i>      |
| Dimensi WO              | 210                       | 0.35                   | 25                    | <i>Triangles</i>      |
| Dimensi w               | 210                       | 0.4                    | 25                    | <i>Honeycomb</i>      |
| Dimensi T               | 205                       | 0.3                    | 25                    | <i>Honeycomb</i>      |
| <i>Tensile Strength</i> | 215                       | 0.35                   | 75                    | <i>Honeycomb</i>      |

Berdasarkan tabel 4.16 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 4.17 dan parameter proses optimum berdasarkan kontribusi ANOVA yang ditunjukkan pada tabel 4.18.

Tabel 4.17. Parameter proses optimum berdasarkan SNR

| Rank | Dimensi LO         | Dimensi WO         | Dimensi w          | Dimensi T          | Tensile Strength   |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1    | Nozzle Temperature | Nozzle Temperature | Nozzle Temperature | Extrusion width    | Infill Density     |
| 2    | Infill Density     | Extrusion width    | Infill Density     | Nozzle Temperature | Nozzle Temperature |
| 3    | Extrusion Width    | Infill Density     | Infill Pattern     | Infill Pattern     | Infill Pattern     |
| 4    | Infill Pattern     | Infill Pattern     | Extrusion width    | Infill Density     | Extrusion width    |

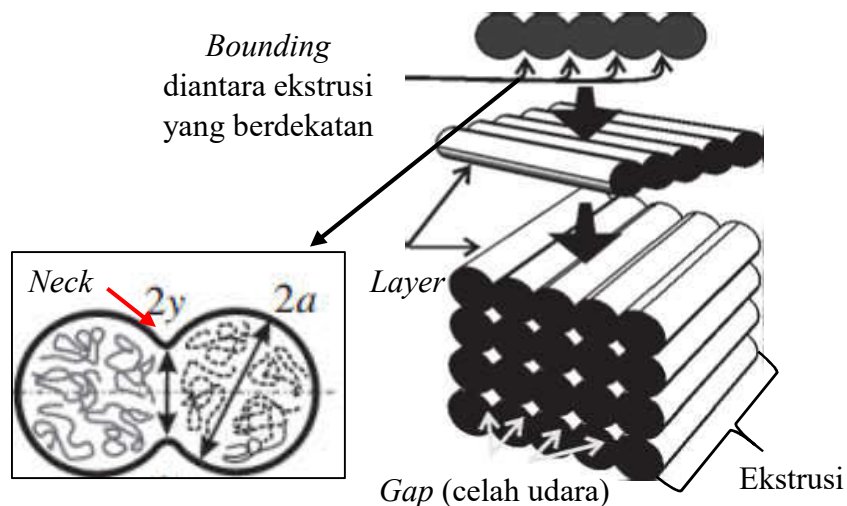
Tabel 4.18. Parameter proses optimum berdasarkan ANOVA

| Rank | Dimensi LO         | Dimensi WO         | Dimensi w          | Dimensi T          | Tensile Strength   |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1    | Nozzle Temperature | Nozzle Temperature | Nozzle Temperature | Extrusion width    | Infill Density     |
| 2    | Infill Density     | Extrusion width    | Infill Density     | Nozzle Temperature | Nozzle Temperature |
| 3    | Extrusion Width    | Infill Density     | Infill Pattern     | Infill Density     | Infill Pattern     |
| 4    | Infill Pattern     | Infill Pattern     | Extrusion width    | Infill Pattern     | Extrusion width    |

Berdasarkan tabel di atas untuk analisis SNR dan ANOVA memiliki hasil yang sama untuk urutan peringkat parameter proses yang paling berpengaruh. Dari analisis yang telah dilakukan parameter proses *nozzle temperature* menunjukkan hasil yang dominan pada respon dimensi produk dan *tensile strength*, meskipun pada *tensile strength* parameter proses optimum adalah *infill density* dimana berpengaruh terhadap masa dari produk 3D *printing* sehingga menghasilkan produk yang lebih kuat. Hal ini ditunjukkan pada *nozzle temperature* yang berada pada peringkat pertama untuk dimensi LO ( $\rho$ : 39.93%), WO ( $\rho$ : 45.47%), W ( $\rho$ : 50.49%), dan berada di peringkat kedua pada dimensi T ( $\rho$ : 21.89%) dan *tensile strength* ( $\rho$ : 14.17%). Sehingga *nozzle temperature* menjadi parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon pada penelitian ini secara keseluruhan.

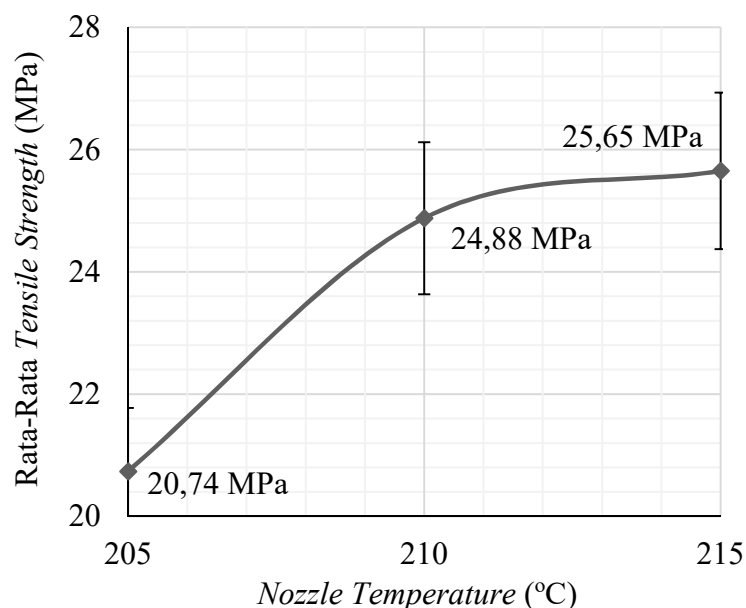
*Nozzle temperature* pada proses fabrikasi *fused deposition modeling* (FDM) adalah parameter proses yang penting. Temperatur pada *nozzle* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan ikatan atau *bound strength* karena mengatur

temperatur awal bahan yang akan diendapkan. Sehingga memiliki efek langsung pada temperatur permukaan ekstrusi yang mengatur pergerakan molekul (reptasi) pada polimer (Coogan dan Kazmer, 2017). *Bound strength* secara langsung dapat mempengaruhi kekuatan dari produk *layer-by-layer* (Reddy dkk, 2007). Gambar 4.13 menjelaskan tentang skema *bounding* antara ekstrusi yang berdekatan.



Gambar 4.13. *Bounding* pada ekstrusi (Bellehumeur dkk, 2004)

Filamen yang diekstrusi adalah sebagai bahan yang diendapkan, didinginkan, mengeras, dan mengikat dengan bahan sekitarnya. Sehingga terdapat proses adhesi dimana lelehan ekstrusi menempel pada ekstrusi yang sudah mengeras karena telah lebih dulu diekstrusi. Pembentukan ikatan dalam proses FDM dipengaruhi oleh energi termal dari material semi cair. Kualitas ikatan yang terbentuk antara masing-masing ekstrusi filamen tergantung pada pertumbuhan leher (*neck*) yang terbentuk antara ekstrusi filamen yang berdekatan dan pengacakan molekuler di antara permukaan ekstrusi (Bellehumeur dkk, 2004). Untuk temperatur ekstrusi yang tinggi akan memperkuat ikatan antar ekstrusi karena dapat meminimalisir terjadinya *gap* di antara *layer*. Pada penelitian ini untuk melihat pengaruh *nozzle temperature*, data-data dari nilai tegangan tarik dikelompokkan sesuai level yang digunakan dan dihitung nilai rata-rata tegangan tariknya. Hasil pengelompokkan nilai tegangan tarik ditunjukkan pada gambar 4.14 yang menjelaskan grafik data rata-rata nilai tegangan tarik untuk setiap level *nozzle temperature*.



Gambar 4.14. Perbandingan tegangan tarik pada level *nozzle temperature*

Berdasarkan gambar 4.14 dapat dilihat bahwa nilai tegangan tarik terus meningkat pada *nozzle temperature* yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa fenomena *bound strength* yang semakin kuat terjadi pada temperatur yang lebih tinggi. Pada hal tersebut juga menjelaskan sebab terjadinya optimasi pada parameter proses *nozzle temperature* berada pada level 3 (215 °C) dikarenakan pada level tersebut dapat menghasilkan adhesi antara dua ekstrusi yang berdekatan menjadi lebih baik sehingga menghasilkan produk yang kuat. Penyebab kecilnya nilai kontribusi *nozzle temperature* ( $\rho$ : 14,17 %) dibandingkan dengan kontribusi *infill density* ( $\rho$ : 48,78%) dikarenakan pada *infill density* sangat berpengaruh pada massa produk. Namun jika diterapkan *infill density* yang sama dengan parameter proses *nozzle temperature* yang berbeda menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap respon kekuatan tarik.

Untuk respon akurasi dimensi, *nozzle temperature* memiliki pengaruh yang sama pada tingkat akurasi dengan rata-rata kontribusi sebesar 40 %. Untuk mengetahui tingkat akurasi produk diperlukan perhitungan dimensi *error*. Dalam perhitungan dimensi *error* dapat disederhanakan dengan menghitung selisih ukuran produk spesimen uji tarik dengan ukuran standar ASTM D638 tipe I. Perhitungan dimensi *error* adalah sebagai berikut:



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

dimana,

$\Delta D$  : dimensi *error*

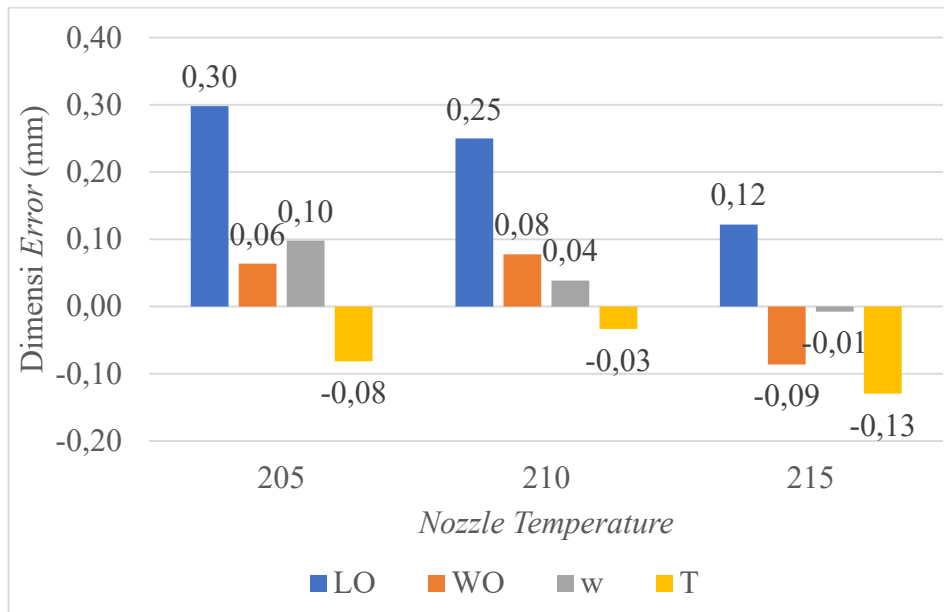
$D_1$  : dimensi produk

$D_2$  : dimensi standar

Berdasarkan perhitungan tersebut didapat data pada dimensi *error* yang diukur pada penelitian ini yaitu LO, WO, w, dan T. Nilai dimensi *error* ditunjukkan pada tabel 4.19. Selanjutnya data rata-rata dimensi *error* disajikan dalam grafik untuk melihat pengaruh pada perlakuan temperatur yang berbeda. Grafik efek *nozzle temperature* ditunjukkan pada gambar 4.15.

Tabel 4.19. Perhitungan dimensi *error*.

| <i>Nozzle Temperature</i><br>(C) | LO          | WO           | w            | T            |
|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 205                              | 0.41        | 0.13         | 0.03         | -0.04        |
|                                  | 0.17        | 0.00         | 0.12         | -0.18        |
|                                  | 0.32        | 0.06         | 0.14         | -0.02        |
| <b>Rata-Rata</b>                 | <b>0.30</b> | <b>0.06</b>  | <b>0.10</b>  | <b>-0.08</b> |
| 210                              | 0.19        | 0.14         | 0.03         | -0.04        |
|                                  | 0.25        | 0.06         | 0.06         | -0.11        |
|                                  | 0.31        | 0.03         | 0.03         | 0.06         |
| <b>Rata-Rata</b>                 | <b>0.25</b> | <b>0.08</b>  | <b>0.04</b>  | <b>-0.03</b> |
| 215                              | 0.13        | 0.06         | 0.03         | -0.18        |
|                                  | 0.09        | -0.17        | -0.01        | -0.13        |
|                                  | 0.15        | -0.15        | -0.04        | -0.08        |
| <b>Rata-Rata</b>                 | <b>0.12</b> | <b>-0.09</b> | <b>-0.01</b> | <b>-0.13</b> |

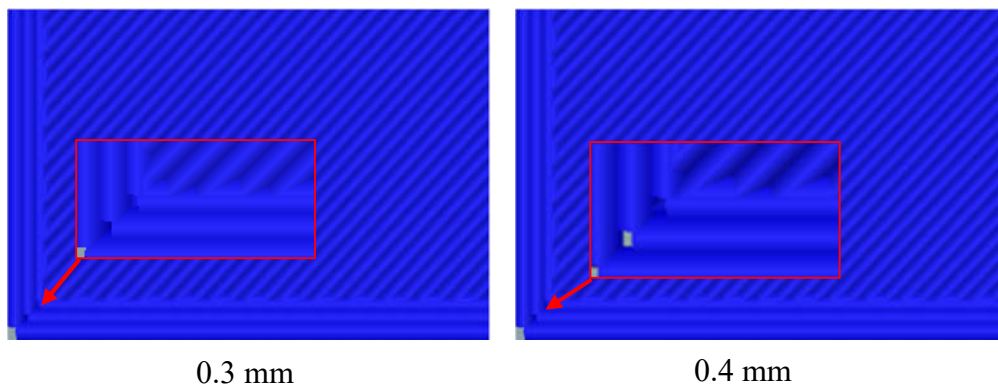


Gambar 4.15. Efek *nozzle temperature* terhadap dimensi *error*

Berdasarkan gambar 4.15 menunjukkan nilai dimensi *error* memiliki variasi kenaikan pada temperatur yang diterapkan. Pada dimensi LO dan w nilai dimensi *error* mengalami perbaikan yang mendekati nilai standar (0). Pada dimensi WO, nilai *error* mengalami kenaikan sedikit lalu turun melewati ukuran standar. Pada dimensi LO, WO dan w nilai *error* yang semakin menurun pada temperatur 215 °C terjadi karena pada temperatur yang lebih rendah ekstrusi yang dikeluarkan menjadi tidak beraturan, sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi memiliki permukaan yang lebih halus karena adhesi yang lebih baik di antara ekstrusi. Namun pada temperatur yang jauh lebih rendah atau lebih tinggi bentuk ekstrusi yang akan keluar bisa jadi memiliki penyimpangan dimensi yang lebih buruk karena sifat polimer yang sensitif terhadap temperatur yang dapat dilihat pada temperatur 215 °C nilai *error* justru berada di bawah dimensi standar. Sedangkan pada dimensi T, nilai yang selalu di bawah standar terjadi karena efek *bed temperature* yang diterapkan selama proses *printing* sehingga *layer* bawah menjadi melebar dan mengurangi tebal dari produk. Pada praktiknya untuk *nozzle* pada 3D *printing* Pursa I-3 dapat dipanaskan mencapai temperatur  $\pm 240$  °C, yang sebenarnya adalah temperatur yang dideteksi oleh *thermocouple* dan belum tentu sama dengan

temperatur di dalam *liquefier* atau *print head*. Penentuan temperatur di dalam *liquefier* dapat berpengaruh pada perilaku material di dalam ruang pencairan.

Parameter proses *extrusion width* secara teori memiliki pengaruh besar terhadap kualitas ikatan. Lebar ekstrusi yang lebih besar memiliki massa yang lebih banyak sehingga memiliki waktu pendinginan yang lebih lama. Lebar yang lebih besar dapat menciptakan area kontak yang lebih besar di antara lapisan sehingga meningkatkan kekuatan ikatan (Coogan dan Kazmer, 2017). Namun pada penelitian ini menunjukkan hasil yang berbeda pada nilai kekuatan tarik. Pada *extrusion width* 0.3 mm memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan lebar 0.4 mm. Hal tersebut dapat dilihat dari percobaan 3 (0.4 mm) dan 7 (0.3mm). Pada percobaan 7 memiliki rata-rata tegangan tarik yang lebih besar yaitu 30.57 MPa dibandingkan dengan percobaan 3 dengan tegangan tarik sebesar 21.76 MPa. Hal ini mungkin terjadi karena proses *slicing* yang menggunakan *software* Slic3r dimana pengaturan *extrusion width* yang lebih kecil menghasilkan permukaan yang lebih rapat dan *gap* yang lebih kecil yang dapat dilihat pada gambar 4.15 hasil *slicing*.



Gambar 4.16. Perbandingan *gap* pada hasil *slicing*

Berdasarkan gambar 4.16 pada dimensi produk hasil menunjukkan parameter proses pada *extrusion width* kecil memiliki permukaan yang lebih baik. Sehingga lebar yang lebih kecil memiliki nilai penyimpangan yang lebih baik, meskipun pada dimensi *w level extrusion width* yang optimum adalah 0.4 mm yang terjadi mungkin karena pengaruh faktor lain seperti kecepatan *print* atau nilai *flow rate*.

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 50% 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.

Parameter proses *infill pattern* pengaruh terhadap respon dimensi *error* tidak terlalu besar, namun pada tegangan tarik memiliki perbedaan pada setiap struktur yang diterapkan. Untuk parameter proses *infill pattern*, hasil menunjukkan pada respon dimensi *error* dan *tensile strength* struktur *honeycomb* masih lebih baik dibandingkan dengan *infill pattern* lain. Hal ini dikarenakan pada *honeycomb* memiliki struktur porositas yang lebih baik karena lebih banyak ikatan struktur dan memiliki masa produk yang sedikit lebih besar dibandingkan *pattern* lain. Pada proses fabrikasi struktur *honeycomb* yang berbentuk segi enam dilakukan dengan menyelesaikan satu per satu strukturnya pada setiap *layer* sehingga ikatan antar struktur yang terbentuk menjadi lebih baik. Pada struktur *grid* (kotak) dan *triangles* (segitiga) diperlukan paling tidak 2 kali proses pada setiap *layer* untuk membentuk strukturnya, sehingga ada sisi yang sudah terlebih dahulu mengalami pendinginan sebelum berikatan dengan sisi lainnya.

#### **4.4. Eksperimen Konfirmasi**

Pemilihan parameter proses dengan menggunakan analisis SNR dan ANOVA, hasil yang didapat adalah sebagai kesimpulan awal karena adanya pencampuran pada setiap percobaan yang ada di desain eksperimen. Ketika eksperimen yang berbentuk fraksional atau ada pemisahan setiap bagian saat proses klasifikasi membuat kemungkinan kombinasi pada parameter proses terbaik tidak nampak pada kombinasi percobaan *orthogonal arrays*. Sehingga perlu dilakukan

eksperimen konfirmasi untuk melakukan pengujian kombinasi parameter proses optimum yang didapat.

Untuk menguji kombinasi parameter proses yang telah didapat dari analisis SNR dan ANOVA dilakukan eksperimen konfirmasi. Eksperimen konfirmasi dilakukan pada parameter optimum untuk nilai tegangan tarik atau *tensile strength* (TS). Pada eksperimen konfirmasi level optimum pada parameter proses yang digunakan sesuai hasil analisis SNR LTB untuk nilai tegangan tarik yang ditunjukkan pada tabel 4.20.

Tabel 4.20. Parameter proses dan level optimum untuk respon kekuatan tarik

| Parameter Proses          | Level Optimum    |
|---------------------------|------------------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 215 °C           |
| <i>Extrusion Width</i>    | 0.35 mm          |
| <i>Infill Density</i>     | 75 %             |
| <i>Infill Pattern</i>     | <i>Honeycomb</i> |

Sebelum melakukan eksperimen konfirmasi terlebih dahulu dilakukan beberapa tahapan 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 tabel ANOVA untuk respon terdapat nilai *F-ratio* dan *P* yang digunakan untuk melihat tingkat pengaruh dan signifikan parameter proses. Dengan *F*-tabel (0.5,2,18) sebesar 3.55 dan nilai *P* pada  $\alpha$ : 0.5, semua parameter proses memiliki pengaruh dan signifikan terhadap respon tegangan tarik. Sehingga ANOVA hanya menunjukkan pentingnya faktor tersebut, untuk menghindari kesalahan dalam analisis diperlukan *pooling* atau menambahkan jumlah kuadrat dari faktor yang memiliki *Sq* (jumlah kuadrat) terkecil sampai memiliki setengah dari nilai *Df* (derajat kebebasan). Pada penelitian ini *orthogonal arrays* yang digunakan adalah L9 ( $3^4$ ) dengan *Df* sebanyak 8 maka *pooling* dilakukan hingga *Df* berjumlah 4 atau menghilangkan dua parameter proses, selanjutnya

memasukan nilai  $Sq$  dan  $Df$  pada faktor *error*. Parameter proses dengan  $Sq$  terkecil yaitu *extrusion width* ( $Sq_B$ ) sebesar 61.183 dan *infill pattern* ( $Sq_D$ ) sebesar 94.154. 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*) =  $S_e + S_{qB} + S_{qD}$   
 $= 130.073 + 61.183 + 94.154 = 285.41$
2.  $Df$  (*pooled e*) =  $Df_e + Df_B + Df_D$   
 $= 18 + 2 + 2 = 22$

Berdasarkan perhitungan *pooling* faktor *error* selanjutnya melakukan perhitungan ulang pada  $Mq$  *error*,  $Sq'$  dan  $p\%$  pada parameter proses yang tersisa. Selanjutnya hasil *pooling* dimasukkan dalam tabel ANOVA akhir ditunjukkan pada tabel 4.21.

Tabel 4.21. Hasil ANOVA akhir

| Source             | Sq       | Df | Mq     | F-ratio | Sq'    | P       | $p\%$ |
|--------------------|----------|----|--------|---------|--------|---------|-------|
| Nozzle Temperature | 125.66   | 2  | 62.83  | 4.84    | 99.71  | 0.018** | 10.61 |
| Infill Density     | 373.78   | 2  | 186.89 | 14.41   | 347.84 | 0.000** | 37.00 |
| <i>e</i>           | 285.41   | 22 | 12.97  | 1.00    | 492.64 | -       | 52.40 |
| St                 | 940.19   | 26 | 31.34  | -       | 940.19 | -       | 100   |
| Mean               | 15238.22 | 2  | -      | -       | -      | -       | -     |
| ST                 | 16023.07 | 27 | -      | -       | -      | -       | -     |

#### 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 yang didasarkan dari kombinasi level parameter optimum. Pada nilai  $\mu$  mempunyai nilai kisaran pada tingkat kepercayaan tertentu atau disebut interval kepercayaan. Interval kepercayaan adalah nilai batas minimum dan maksimum dimana penelitian ini mengharapkan hasil sebenarnya akan berada di dalam interval kepercayaan tersebut. *Confidence interval* (CI) atau tingkat kepercayaan ditentukan sebesar 95% atau  $\alpha$ : 0.05 yang berarti 95% dari rata-rata hasil akan berada di antara interval yang ditentukan. Nilai  $\alpha$ : 0.05 digunakan untuk mencari nilai F-tabel pada tabel distribusi F yang

selanjutnya digunakan dalam perhitungan CI. Berikut adalah perhitungan nilai  $\mu$  dan CI.

Diketahui:

|                     |              |
|---------------------|--------------|
| $\bar{Y}$           | : 23.76 MPa  |
| $\bar{A}_3$         | : 25.65 MPa  |
| $\bar{B}_2$         | : 25.22 MPa  |
| $\bar{C}_3$         | : 28.72 MPa  |
| $\bar{D}_1$         | : 26.30 MPa  |
| $F_{(0.05;1;22)}$   | : 4.30       |
| $MSe$ (pooled e TS) | : 12.973     |
| N                   | : 9 x 3 = 27 |
| $Df_{\mu}$          | : 1          |
| Df faktor           | : 8          |

Ditanya:

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

Penyelesaian:

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

$$\begin{aligned}\mu_{\text{prediksi}} &= \bar{y} + (\bar{A}_3 - \bar{y}) + (\bar{B}_2 - \bar{y}) + (\bar{C}_3 - \bar{y}) + (\bar{D}_1 - \bar{y}) \\ &= 23.77 + (25.65 - 23.76) + (25.22 - 23.76) \\ &\quad + (28.72 - 23.76) + (26.30 - 23.76) \\ &= 34.63 \text{ MPa}\end{aligned}$$

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

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

$$n_{\text{eff}} = \frac{27}{1+8} = \frac{27}{9} = 3$$

$$\begin{aligned}\text{CI} &= \pm \sqrt{4.30 \times 12.973 \times \left(\frac{1}{3}\right)} \\ &= \pm 4.31\end{aligned}$$

Jadi dengan perhitungan  $\mu_{\text{prediksi}}$  dan CI didapat interval kepercayaan untuk rata-rata prediksi proses optimum adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{prediksi}} - \text{CI} &\leq \mu_{\text{prediksi}} \leq \mu_{\text{prediksi}} + \text{CI} \\ 34.63 - 4.31 &\leq 34.63 \leq 34.63 + 4.31 \\ 30.32 \text{ MPa} &\leq 34.63 \text{ MPa} \leq 38.95 \text{ MPa}\end{aligned}$$

#### 4.4.3. Hasil dan Analisis Eksperimen Konfirmasi

Selanjutnya dilakukan eksperimen konfirmasi pengujian tarik berdasarkan parameter proses optimum dan didapat spesimen dengan replikasi sebanyak 3 kali. Spesimen eksperimen konfirmasi ditunjukkan pada gambar 4.17, dan hasil pengujian tarik ditunjukkan pada tabel 4.22 dengan kurva  $F_{\text{max}}$  dari pengujian tarik ditunjukkan pada gambar 4.18.

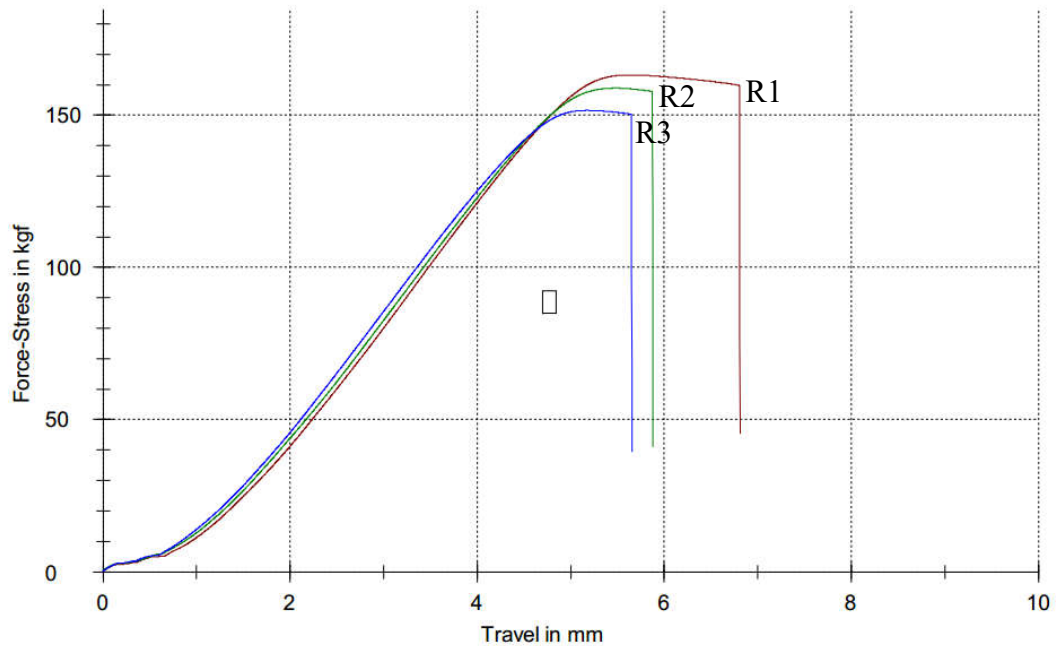


Gambar 4.17. Spesimen eksperimen konfirmasi setelah pengujian tarik

Tabel 4.22. Hasil pengujian tarik eksperimen konfirmasi

| Replikasi | T (mm) | w (mm) | $F_{\text{max}}$ (N) | <i>Tensile Strength</i> (MPa) | Rata-Rata (MPa) | Standar Deviasi |
|-----------|--------|--------|----------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1         | 3.98   | 13.00  | 1600.44              | 30.93                         | 30.52           | 0.46            |
| 2         | 3.90   | 13.05  | 1558.08              | 30.61                         |                 |                 |
| 3         | 3.85   | 12.85  | 1485.26              | 30.02                         |                 |                 |

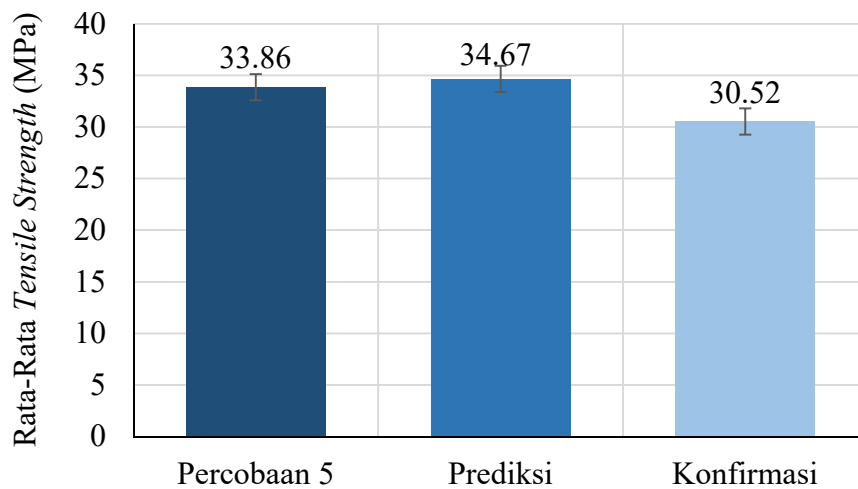




Gambar 4.18. Kurva  $F_{max}$  eksperimen konfirmasi

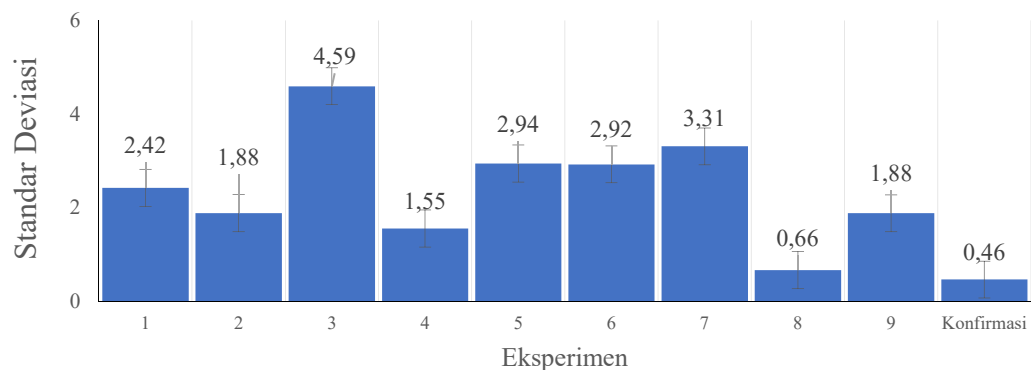
Berdasarkan gambar 4.17 spesimen eksperimen konfirmasi setelah dilakukan pengujian tarik menunjukkan hasil yang lebih baik dengan letak patahan untuk semua replikasi berada pada *gage length* dan posisinya cenderung sama. Kurva  $F_{max}$  gambar 4.18 menunjukkan bentuk yang sama seperti percobaan sebelumnya dengan kurva dimulai dengan  $F$  yang rendah dikarenakan pembebanan awal yang belum mencapai beban maksimal.

Hasil dari eksperimen konfirmasi adalah nilai tegangan tarik terkecil terdapat pada replikasi ke 3 yaitu 30.02 MPa dan terbesar terdapat pada replikasi ke 1 yaitu 30.93 MPa dengan rata-rata keseluruhan sebesar 30.52 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan tarik eksperimen konfirmasi memenuhi syarat tingkat kepercayaan 95% dimana hasil berada di dalam interval kepercayaan ( $30.32 \text{ MPa} \leq 30.52 \text{ MPa} \leq 38.95 \text{ MPa}$ ). Perbandingan nilai rata-rata respon tegangan tarik pada percobaan tertinggi yaitu percobaan 5, prediksi rata-rata tegangan tarik ( $\mu$ ) dan tegangan tarik konfirmasi disajikan dalam diagram batang pada gambar 4.19.



Gambar 4.19. Diagram batang perbandingan nilai tegangan tarik

Berdasarkan diagram batang di atas menunjukkan nilai tegangan tarik pada percobaan 5 mendekati nilai prediksi rata-rata, sedangkan tegangan tarik pada eksperimen konfirmasi berada di bawah nilai percobaan 5 dan rata-rata prediksi. Meskipun nilai tegangan tarik eksperimen konfirmasi masih di bawah hasil percobaan 5, akan tetapi dilihat dari tingkat variasi pada replikasinya mengalami perbaikan dimana nilai standar deviasi eksperimen konfirmasi lebih kecil dibandingkan dengan sembilan percobaan sebelumnya. Nilai standar deviasi pada sembilan percobaan dan eksperimen konfirmasi ditunjukkan pada diagram batang gambar 4.20.



Gambar 4.20. Diagram batang perbandingan nilai standar deviasi

Berdasarkan nilai standar deviasi pada setiap percobaan menunjukkan bahwa pada eksperimen konfirmasi memiliki tingkat konsistensi yang lebih baik. Dalam hal ini optimasi parameter yang dihasilkan menggunakan metode taguchi terbukti dapat meningkatkan kualitas produk pada nilai kekuatan tarik dengan nilai deviasi yang kecil. Selain itu dengan hasil dari kombinasi level pada parameter proses tersebut dapat digunakan untuk mendesain sebuah produk yang ringan dan hemat material karena hasil cetakan tidak sepenuhnya terisi material.