

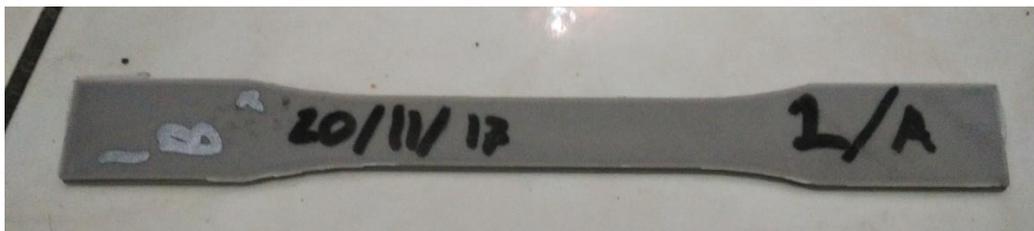
BAB IV HASIL DAN ANALISIS

4.1. Hasil Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan spesimen dengan standar ASTM-D638 tipe I, menghasilkan 27 spesimen yang terdiri dari sembilan (9) percobaan dengan tiga (3) kali pengulangan. Proses pencetakan spesimen ini menggunakan alat 3D *printer* yang berada di LAB Program Study Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Sebelum dilakukan tahap analisis, spesimen yang telah dicetak akan dilakukan pengukuran massa, pengambilan data waktu pencetakan dan pengukuran spesimen. Berikut ini tabel *design of experiment* (DOE) yang ditunjuk pada tabel 4.1 serta gambar spesimen hasil pencetakan dengan alat 3D *Printer* dengan standar ASTM-D368 I

Tabel 4.1. Data parameter proses

| NO | Parameter Proses | | |
|----|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | <i>Nozzle Temperature</i> (°C) | <i>Extrusion Width</i> (mm) | <i>Infill Density</i> (%) |
| 1 | 230 | 0,3 | 25 |
| 2 | 230 | 0,35 | 50 |
| 3 | 230 | 0,4 | 75 |
| 4 | 235 | 0,3 | 50 |
| 5 | 235 | 0,35 | 75 |
| 6 | 235 | 0,4 | 25 |
| 7 | 240 | 0,3 | 75 |
| 8 | 240 | 0,35 | 25 |
| 9 | 240 | 0,4 | 50 |



Gambar 4.1. Contoh hasil pencetakan spesimen

4.1.1. Hasil Pengukuran Massa dan Waktu

Setelah 27 spesimen dicetak menggunakan alat 3D Printer maka perlu dilakukan penimbangan massa dan pencatatan waktu (lama pencetakan). Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh parameter proses terhadap hasil penimbangan massa dan lama pencetakan. Nilai yang didapatkan merupakan hasil rata – rata dari setiap percobaan. Berikut ini tabel data hasil penimbangan massa dan waktu.

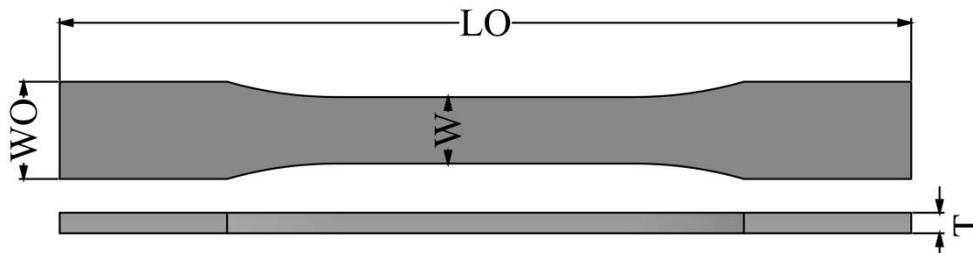
Tabel 4.2. Hasil pengukuran massa dan waktu pembuatan.

| Percobaan | Massa | | | Rata – Rata Massa(gr) | Waktu (menit) | Standar Deviasi |
|-----------|---------|---------|---------|-----------------------|---------------|-----------------|
| | R1 (gr) | R2 (gr) | R3 (gr) | | | |
| 1 | 4,95 | 5,91 | 5,92 | 5,59 | 94 | 0,455 |
| 2 | 7,2 | 7,31 | 7,28 | 7,26 | 95 | 0,046 |
| 3 | 8,64 | 8,54 | 8,72 | 8,63 | 89 | 0,074 |
| 4 | 7,45 | 7,58 | 7,51 | 7,51 | 107 | 0,053 |
| 5 | 8,73 | 8,81 | 8,69 | 8,74 | 102 | 0,050 |
| 6 | 5,87 | 6,01 | 6,03 | 5,97 | 71 | 0,071 |
| 7 | 8,22 | 8,21 | 8,23 | 8,22 | 121 | 0,008 |
| 8 | 5,87 | 5,9 | 5,7 | 5,82 | 79 | 0,088 |
| 9 | 7,44 | 7,49 | 7,42 | 7,45 | 82 | 0,029 |

Berdasarkan tabel 4.2 hasil pengukuran massa dan waktu pembuatan spesimen uji sangat dipengaruhi oleh parameter *nozzle temperature*, *extrusion width* dan *infill density* namun seberapa besar pengaruh parameter tersebut terhadap hasil pengukuran massa dan waktu belum dapat diketahui. Hasil pengukuran massa dan waktu terbesar pada percobaan ke 5 dengan massa rata – rata sebesar 8,74 gram hal ini disebabkan karena parameter *infill density* semakin besar. Parameter yang paling berpengaruh terhadap massa yaitu semakin besar level parameter dari *extrusion width* dan *infill density* maka massa akan semakin besar, sedangkan semakin kecil level parameter *extrusion width* dan semakin besar level parameter *infill density* maka waktu pembuatan akan semakin lama. Jika semakin besar level parameter *nozzle temperature* maka waktu pembuatan akan semakin cepat.

4.1.2. Hasil Pengukuran Dimensi

Untuk menganalisis hasil tabel SNR dan ANOVA, dibutuhkan data hasil pengukuran dimensi *length overall* (LO), *width overall* (WO), *width* (W), dan *thickness* (T). Hasil pengukuran dimensi merupakan hasil rata – rata dengan satuan millimeter. Berikut ini gambar panduan pengukuran dimensi, serta tabel hasil pengukuran dimensi.



Gambar 4.2. Panduan Pengukuran Dimensi

Tabel 4.3. Hasil Pengukuran Dimensi

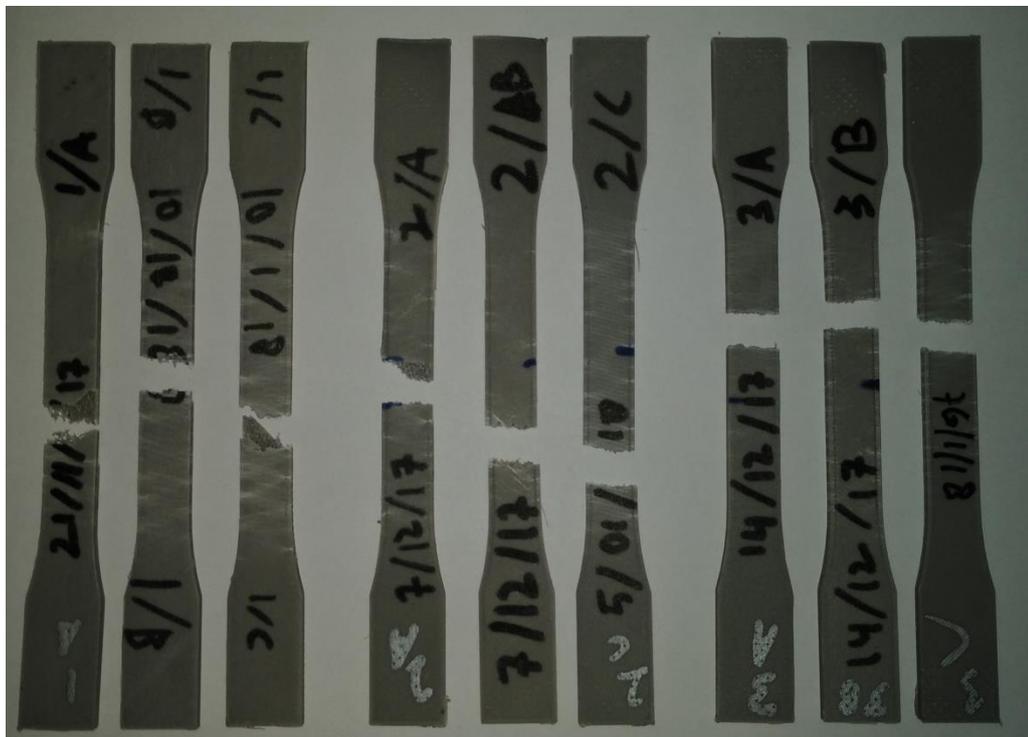
| Percobaan | Length Overall (LO) | | | Width Overall (WO) | | | Width (w) | | | Thickness (T) | | |
|-----------|---------------------|--------|--------|--------------------|-------|-------|-----------|-------|-------|---------------|------|------|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| 1 | 165,60 | 165,40 | 165,50 | 18,90 | 18,85 | 19,00 | 13,00 | 13,18 | 13,07 | 4,08 | 4,01 | 3,94 |
| 2 | 165,70 | 165,60 | 165,40 | 18,90 | 18,78 | 18,93 | 13,04 | 13,03 | 13,03 | 4,13 | 4,14 | 4,03 |
| 3 | 165,30 | 165,40 | 164,90 | 18,88 | 18,78 | 18,78 | 12,80 | 12,87 | 12,87 | 4,22 | 4,26 | 4,27 |
| 4 | 165,15 | 165,30 | 165,10 | 19,05 | 18,90 | 18,65 | 13,33 | 13,08 | 13,07 | 4,15 | 3,99 | 4,01 |
| 5 | 165,30 | 165,60 | 165,20 | 19,00 | 19,03 | 18,80 | 13,19 | 13,25 | 13,04 | 4,11 | 4,14 | 4,18 |
| 6 | 165,00 | 164,90 | 165,15 | 18,80 | 19,10 | 18,88 | 13,10 | 13,18 | 12,86 | 4,13 | 4,08 | 4,13 |
| 7 | 164,70 | 165,15 | 164,75 | 18,93 | 18,83 | 19,00 | 12,98 | 12,86 | 12,85 | 4,11 | 4,09 | 4,06 |
| 8 | 165,20 | 165,30 | 165,30 | 19,00 | 18,88 | 18,93 | 13,02 | 13,13 | 12,99 | 4,05 | 4,15 | 4,16 |
| 9 | 165,12 | 165,10 | 165,00 | 18,45 | 18,98 | 18,98 | 12,95 | 12,83 | 12,79 | 4,27 | 4,19 | 4,20 |

4.1.3. Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan di Badan Penelitian dan Pengembangan Industri, Balai Besar Kulit, Karet dan Plastik (BBKKP) Yogyakarta. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai *tensile strength* dari spesimen. Metode pengujian yang dilakukan adalah sesuai standar ASTM, dengan kecepatan pengujian sebesar 5 mm/menit. Berikut ini gambar proses uji tarik dan hasil pengujian tarik, serta tabel nilai F_{max} dan perpanjangan.



Gambar 4.3. Proses pengujian tarik



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.4. (a-c) spesimen hasil uji tarik

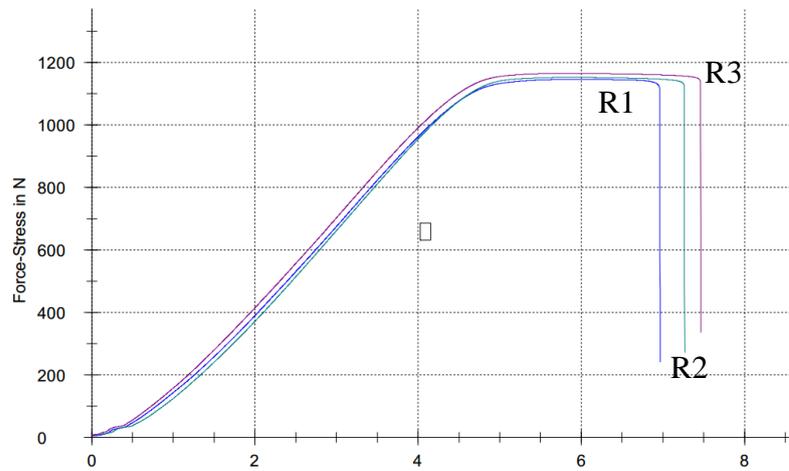
Tabel 4.4. Hasil pengujian tarik

| No | Fmax (Kgf) | | | Δx (mm) | | |
|----|------------|---------|---------|---------|------|------|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| 1 | 57,251 | 82,296 | 71,251 | 5,1 | 6,78 | 7,44 |
| 2 | 93,299 | 84,707 | 100,113 | 5,89 | 6,02 | 7,37 |
| 3 | 114,35 | 113,778 | 111,019 | 5,37 | 7,34 | 6,71 |
| 4 | 104,068 | 101,639 | 92,519 | 5,83 | 7,62 | 8,12 |
| 5 | 116,829 | 117,463 | 118,734 | 6,97 | 7,27 | 7,47 |
| 6 | 81,897 | 84,495 | 82,151 | 6,15 | 6,45 | 6,59 |
| 7 | 88,403 | 112,961 | 111,761 | 7,28 | 6,59 | 6,09 |
| 8 | 78,882 | 76,625 | 77,366 | 5,82 | 6,33 | 6,54 |
| 9 | 97,27 | 95,772 | 97,233 | 7,13 | 7,52 | 6,47 |

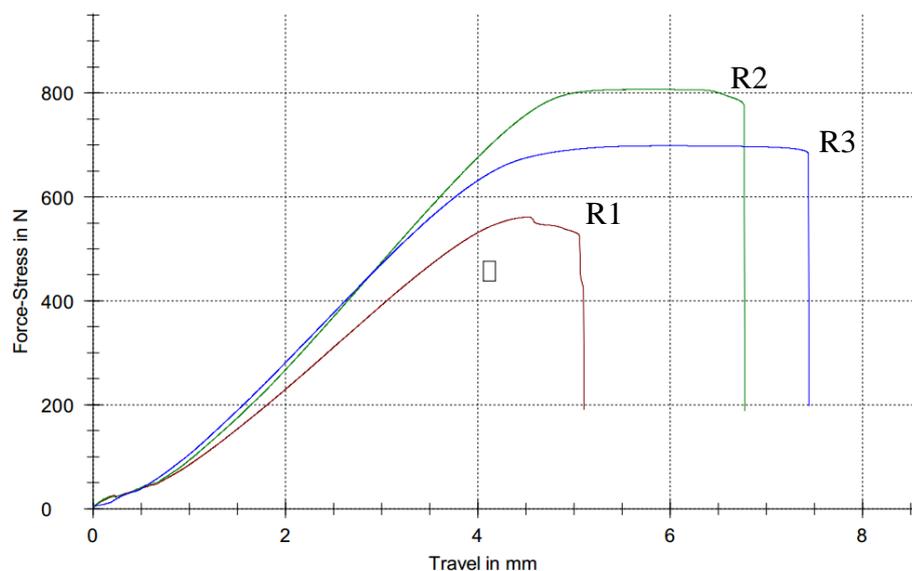
Berdasarkan hasil pengujian tarik yang telah dilakukan didapatkan nilai beban yang maksimal atau *Fmax* dengan satuan *kilogram force* (Kgf) dan perpanjangan (mm). hasil tersebut merupakan hasil murni yang didapatkan setelah pengujian tarik. Berdasarkan data tabel hasil pengujian tarik, nilai *Fmax* terbesar terdapat pada percobaan ke 5 (R3) dengan nilai 118,734 Kgf dan nilai *Fmax* terkecil terdapat pada percobaan ke 1 (R1) dengan nilai 57,251 Kgf. Sedangkan nilai perpanjangan spesimen terbesar terdapat pada percobaan ke 4 (R3) dengan nilai 8,12 mm dan nilai perpanjangan terkecil terdapat pada percobaan ke 1 (R1). Berikut ini tabel *Fmax* hasil pengujian tarik dengan satuan newton (N) dan kurva hasil pengujian tarik pada spesimen dengan nilai *Fmax* terkecil dan *Fmax* terbesar.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian tarik *Fmax* (N)

| No | Fmax (N) | | |
|----|----------|--------|--------|
| | R1 | R2 | R3 |
| 1 | 561,44 | 807,05 | 689,73 |
| 2 | 914,95 | 830,69 | 981,77 |
| 3 | 1121,4 | 1115,8 | 1088,7 |
| 4 | 1020,6 | 996,74 | 907,3 |
| 5 | 1145,7 | 1151,9 | 1164,4 |
| 6 | 803,14 | 828,61 | 805,63 |
| 7 | 866,94 | 1107,8 | 1096 |
| 8 | 773,57 | 751,43 | 758,7 |
| 9 | 953,89 | 939,2 | 953,53 |



Gambar 4.5 Kurva percobaan ke 5



Gambar 4.6 Kurva pada percobaan ke 1

Berdasarkan kurva dan data tabel tersebut, nilai antara percobaan pertama sampai ke sembilan rata – rata tidak terlalu jauh perbedaannya, sehingga variasi antara percobaan pertama sampai ke sembilan tidak terlalu banyak. Pada gambar 4.6. kurva percobaan pertama nilai F_{max} yang didapatkan bervariasi dari R1 (561,44 N), R2 (807,07 N), dan R3 (689,73 N). Nilai kekuatan tarik dari setiap percobaan akan bervariasi meskipun dengan pengulangan sampai tiga kali. Hal ini disebabkan karena proses manufaktur yang dilakukan belum optimum atau disebabkan karena alat yang digunakan belum bisa stabil dalam prosesnya.

Selanjutnya nilai F_{max} yang didapatkan akan dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai tegangan tarik (*tensile strength*). Berikut ini perhitungan tegangan tarik pada percobaan ke 5.

Diketahui :

$$F_{5R1} = 116,829 \text{ Kgf} \times (9,80665) = 1145,7 \text{ N}$$

$$F_{5R2} = 117,463 \text{ Kgf} \times (9,80665) = 1151,9 \text{ N}$$

$$F_{5R3} = 118,734 \text{ Kgf} \times (9,80665) = 1164,4 \text{ N}$$

$$W_{5R1} = 13,19 \text{ mm}$$

$$W_{5R2} = 13,25 \text{ mm}$$

$$W_{5R3} = 13,04 \text{ mm}$$

$$T_{5R1} = 4,11 \text{ mm}$$

$$T_{5R2} = 4,14 \text{ mm}$$

$$T_{5R3} = 4,18 \text{ mm}$$

Ditanya : $\sigma = \dots?$

Jawab :

$$\begin{aligned}\sigma_{5R1} &= \frac{F}{A_0} = \frac{F}{w \times T} \\ &= \frac{1145,70 \text{ N}}{13,19 \text{ mm} \times 4,11 \text{ mm}} = 21,15 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{5R2} &= \frac{F}{A_0} = \frac{F}{w \times T} \\ &= \frac{1151,92 \text{ N}}{13,25 \text{ mm} \times 4,14 \text{ mm}} = 21,02 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{5R3} &= \frac{F}{A_0} = \frac{F}{w \times T} \\ &= \frac{1164,38 \text{ N}}{13,04 \text{ mm} \times 4,18 \text{ mm}} = 21,35 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Selanjutnya semua percobaan dilakukan perhitungan tarik untuk mendapatkan nilai *tensile strength*. Berikut ini tabel hasil perhitungan tegangan tarik yang ditunjukkan pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Hasil perhitungan tegangan tarik

| Percobaan | <i>Tensile Strength</i> (MPa) | | | Rata – rata (MPa) | Standar Deviasi |
|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------------------|-----------------|
| | R1 | R2 | R3 | | |
| 1 | 10,58 | 15,26 | 13,57 | 13,14 | 1,94 |
| 2 | 17,00 | 15,41 | 18,69 | 17,03 | 1,34 |
| 3 | 20,78 | 20,35 | 19,82 | 20,32 | 0,40 |
| 4 | 18,43 | 19,11 | 17,30 | 18,28 | 0,75 |
| 5 | 21,15 | 21,02 | 21,35 | 21,17 | 0,14 |
| 6 | 14,86 | 15,41 | 15,18 | 15,15 | 0,22 |
| 7 | 16,25 | 21,08 | 21,03 | 19,45 | 2,26 |
| 8 | 14,69 | 13,80 | 14,05 | 14,18 | 0,38 |
| 9 | 17,24 | 17,46 | 17,76 | 17,49 | 0,21 |

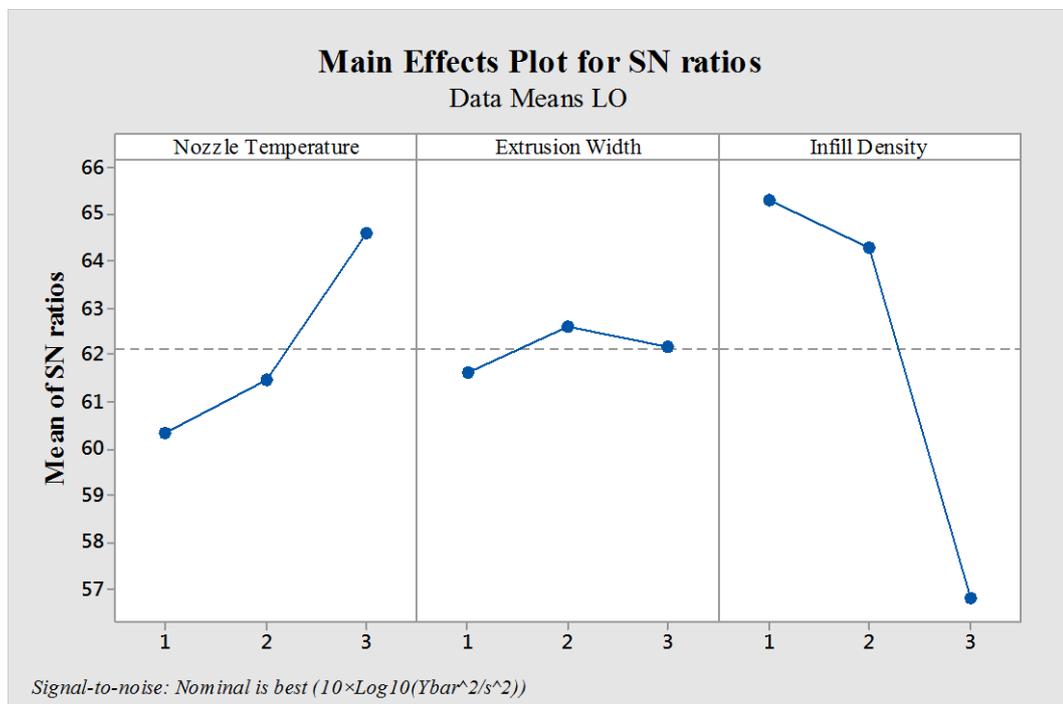
4.2. Analisis SNR

Untuk mendapatkan nilai dan grafik SNR (*signal to noise ratio*) yaitu menggunakan aplikasi minitab dimana data yang dimasukkan merupakan nilai rata – rata (*mean*) dari tiga *replikasi* (pengulangan) yaitu R1, R2, dan R3. Dalam hal ini penggunaan SNR perlu dilakukan karena untuk mengetahui level faktor atau parameter proses yang berpengaruh terhadap hasil respon. Sesuai dengan tujuan penelitian ini, untuk mengetahui parameter yang berpengaruh terhadap respon akurasi dimensi dan kekuatan tarik, maka analisis SNR menggunakan aplikasi Minitab 2017. Hasil dari aplikasi minitab berupa tabel respon dan grafik *main effect*.

Metode SNR yang digunakan untuk menganalisis yaitu *nominal is the best* (NTB) atau tertuju pada suatu nilai tertentu serta nilai nya tidak nol dan terbatas. Metode SNR dengan NTB yaitu memilih nilai tertinggi dari setiap level parameter yang memiliki gangguan paling sedikit. Berikut ini tabel, grafik dan analisis SNR dari data mean LO, W, WO, T dan TS.

Tabel 4.7 Respon dimensi LO

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Infill Density</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 60,39 | 61,82 | 65,54 |
| 2 | 61,57 | 62,71 | 64,61 |
| 3 | 64,89 | 62,17 | 56,96 |
| Delta | 4,50 | 0,89 | 8,58 |
| Rank | 2 | 3 | 1 |

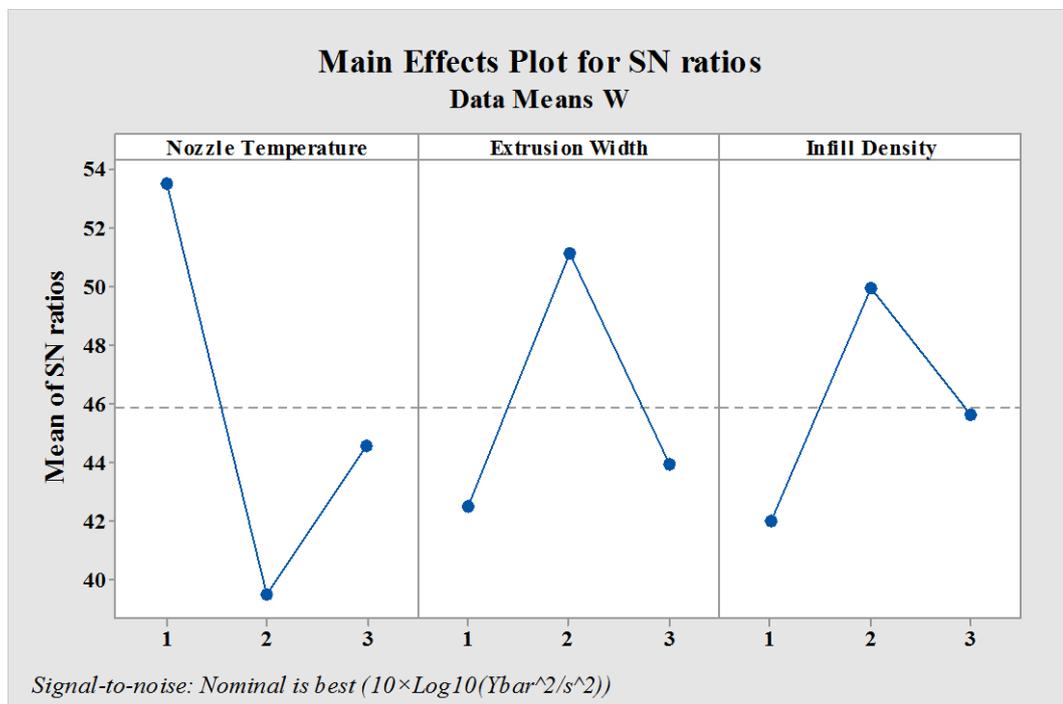


Gambar 4.7. Grafik *main effect plot* untuk dimensi LO

Berdasarkan tabel 4.7 respon dimensi LO nilai yang didapat merupakan hasil pengacakan nilai dari masing – masing parameter proses dengan melihat nilai *noise*. Sehingga respon SNR pada dimensi LO level optimum atau yang paling berpengaruh adalah *nozzle temperature* pada (240 °C), *extrusion width* pada (0,35 mm) dan *infill density* pada (25%). Berdasarkan grafik pengaruh parameter terhadap respon dimensi LO terlihat variable respon yang merata dengan setiap level memiliki nilai yang optimum dan nilai yang tertinggi pada grafik yang ditunjukkan gambar 4.7 adalah nilai *infill density* dengan nilai 65,54.

Tabel 4.8. Respon dimensi W

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Infill Density</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 53,59 | 42,89 | 42,31 |
| 2 | 39,94 | 51,23 | 49,96 |
| 3 | 44,61 | 44,11 | 45,94 |
| Delta | 13,65 | 8,34 | 7,65 |
| Rank | 1 | 2 | 3 |

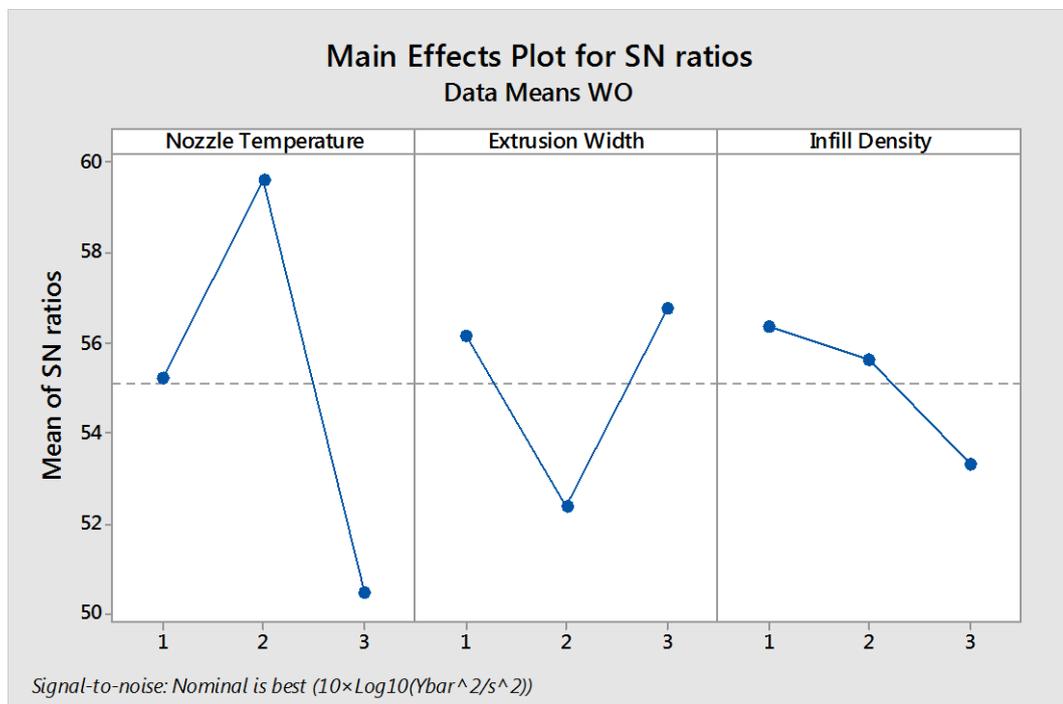


Gambar 4.8. Grafik *main effect plot* untuk dimensi w

Berdasarkan tabel 4.8 respon dimensi W nilai yang didapat merupakan hasil pengacakan nilai dari masing – masing parameter proses dengan melihat nilai *noise*. Sehingga respon SNR pada dimensi W level optimum atau yang paling berpengaruh adalah *nozzle temperature* pada (230 °C), *extrusion width* pada (0,35 mm) dan *infill density* pada (50%). Berdasarkan grafik pengaruh parameter terhadap respon dimensi W terlihat variable respon yang didominasi dengan level yang kedua sebagai nilai yang optimum dan nilai yang tertinggi pada grafik yang ditunjukkan gambar 4.8 adalah nilai *nozzle temperature* dengan nilai 53,59.

Tabel 4.9 Respon dimensi WO

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Infill Density</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 55,22 | 56,17 | 56,37 |
| 2 | 59,61 | 52,39 | 55,61 |
| 3 | 50,47 | 56,77 | 53,33 |
| Delta | 9,13 | 4,42 | 3,04 |
| Rank | 1 | 2 | 3 |

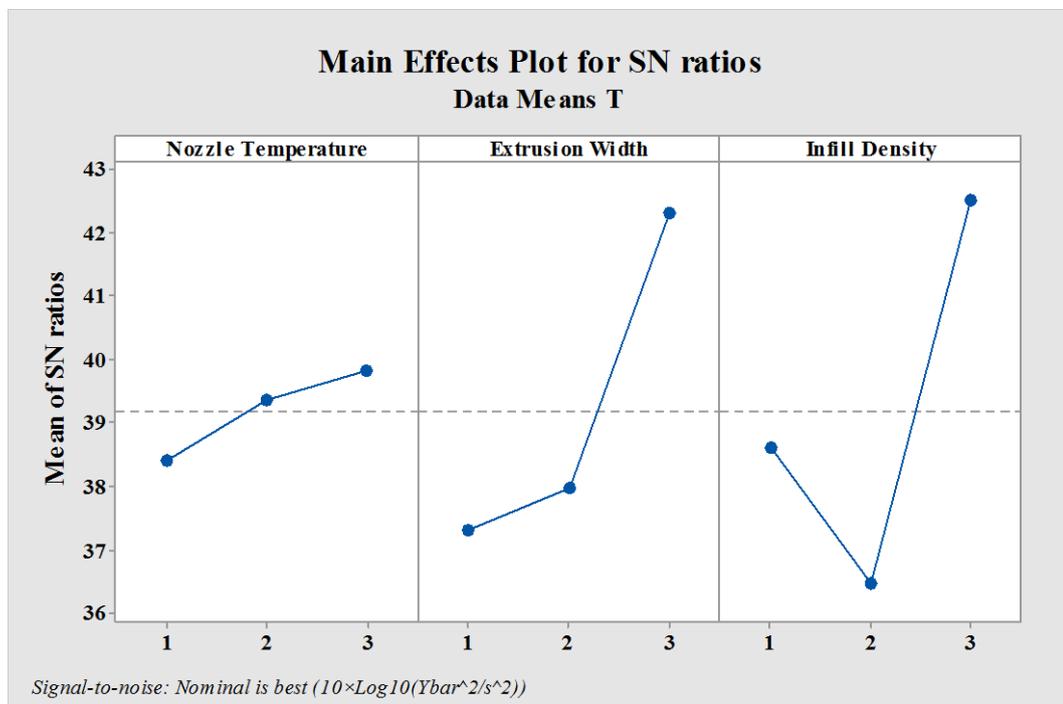


Gambar 4.9 Grafik *main effect plot* untuk dimensi WO

Berdasarkan tabel 4.9 respon dimensi WO nilai yang didapat merupakan hasil pengacakan nilai dari masing – masing parameter proses dengan melihat nilai *noise*. Sehingga respon SNR pada dimensi WO level optimum atau yang paling berpengaruh adalah *nozzle temperature* pada (235 °C), *extrusion width* pada (0,4 mm) dan *infill density* pada (25%). Berdasarkan grafik pengaruh parameter terhadap respon dimensi WO terlihat variable respon yang merata dengan setiap level memiliki nilai yang optimum dan nilai yang tertinggi pada grafik yang ditunjukkan gambar 4.9 adalah nilai *nozzle temperature* dengan nilai 59,61.

Tabel 4.10. Respon dimensi T

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Infill Density</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 38,24 | 37,46 | 38,37 |
| 2 | 39,42 | 37,97 | 36,44 |
| 3 | 39,89 | 42,34 | 42,47 |
| Delta | 1,65 | 4,88 | 6,03 |
| Rank | 3 | 2 | 1 |

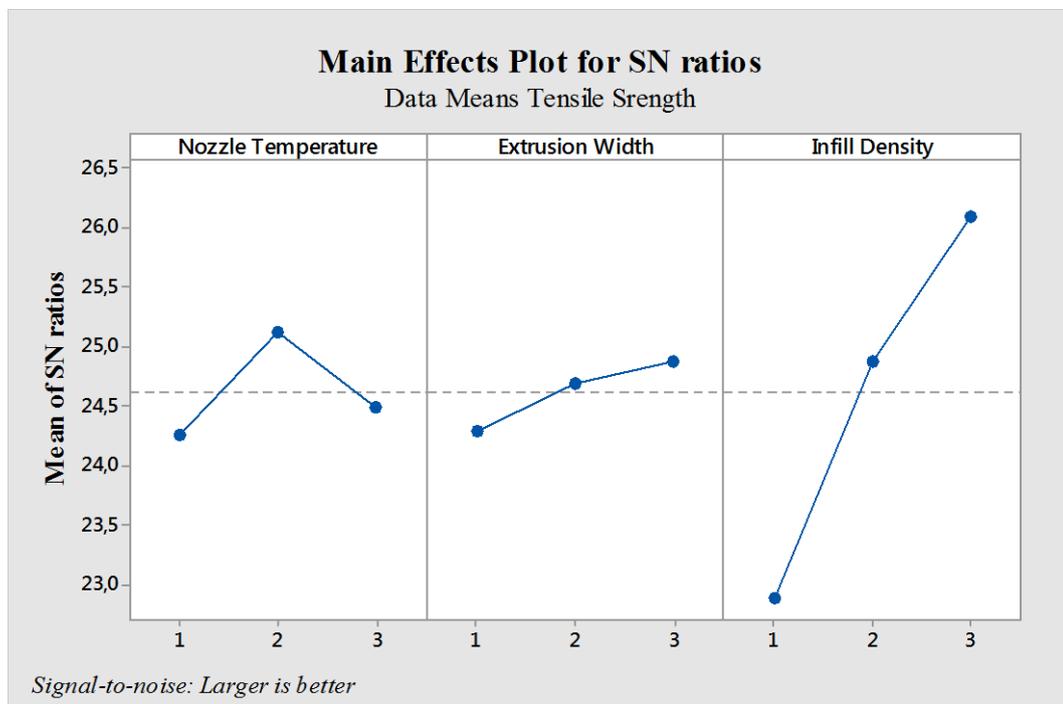


Gambar 4.10. Grafik *main effect plot* untuk dimensi T

Berdasarkan tabel 4.10 respon dimensi T nilai yang didapat merupakan hasil pengacakan nilai dari masing – masing parameter proses dengan melihat nilai *noise*. Sehingga respon SNR pada dimensi T level optimum atau yang paling berpengaruh adalah *nozzle temperature* pada (240 °C), *extrusion width* pada (0,4 mm) dan *infill density* pada (75%). Berdasarkan grafik pengaruh parameter terhadap respon dimensi T terlihat variable respon yang didominasi dengan level yang ketiga sebagai nilai yang optimum dan nilai yang tertinggi pada grafik yang ditunjukkan gambar 4.10 adalah nilai *infill density* dengan nilai 42,47.

Tabel 4.11 Respon kekuatan tarik (TS)

| <i>Level</i> | <i>Nozzle Temperature</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Infill Density</i> |
|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 24,25 | 24,29 | 22,90 |
| 2 | 25,11 | 24,70 | 24,87 |
| 3 | 24,49 | 24,86 | 26,08 |
| Delta | 0,86 | 0,58 | 3,19 |
| Rank | 2 | 3 | 1 |



Gambar 4.12. Grafik *main effect plot* untuk nilai TS

Berdasarkan tabel 4.11 respon dimensi TS nilai yang didapat merupakan hasil pengacakan nilai dari masing – masing parameter proses dengan melihat nilai *noise*. Sehingga respon SNR pada dimensi TS level optimum atau yang paling berpengaruh adalah *nozzle temperature* pada (235 °C), *extrusion width* pada (0,4 mm) dan *infill density* pada (75%). Berdasarkan grafik pengaruh parameter terhadap respon dimensi TS terlihat variable respon yang didominasi dengan level yang ketiga sebagai nilai yang optimum dan nilai yang tertinggi pada grafik yang ditunjukkan gambar 4.11 adalah nilai *infill density* dengan nilai 26,08. Berikut ini tabel nilai respon optimum dari semua dimensi.

Tabel 4.12 Nilai optimum dari respon dimensi dan TS

| Dimensi | Nozzle Temperature (°C) | Extrusion Width (mm) | Infill Density (%) |
|---------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| LO | 240 | 0,35 | 25 |
| W | 230 | 0,35 | 50 |
| WO | 235 | 0,4 | 25 |
| T | 240 | 0,4 | 75 |
| TS | 235 | 0,4 | 75 |

Nilai optimum dari setiap variasi parameter dapat ditunjukkan dengan tabel respon dimensi. Pengaruh variasi parameter ini dapat dianalisis menggunakan SNR sehingga hasil yang didapatkan akan berbeda – beda sesuai dengan respon variabelnya. Tabel respon juga dapat menunjukkan tingkatan pengaruh variasi parameter dengan melihat nilai selisih terbesar atau *delta* dari ketiga level. Jika semakin besar nilai *delta* maka pengaruh pengacakan level terhadap variasi parameter proses akan semakin besar juga. Hal ini dapat berlaku pada setiap percobaan yang telah dilakukan. Setelah analisis menggunakan SNR dengan mengetahui nilai yang optimum pada parameter proses perlu dilakukan analisis tambahan untuk mengklasifikasikan hasil percobaan secara data statistik menggunakan *analysis of variance* (ANOVA).

4.3. Analisis ANOVA

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 ρ%. Pada penelitian ini ditentukan nilai *critical significant* atau *alpha-error* sebesar α : 0.05 (5%). Nilai α : 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*

e : *Error*

T : Jumlah total

N : Jumlah eksperimen

n : Jumlah eksperimen pada faktor

1. Jumlah Kuadrat Total Data (ST)

$$\begin{aligned}
 ST &= \sum y^2 \\
 &= 165.60^2 + 165.40^2 + 165.50^2 + 165.70^2 + 165.60^2 + 165.40^2 + 165.30^2 + \\
 &\quad 165.40^2 + 164.90^2 + 165.15^2 + 165.30^2 + 165.10^2 + 165.30^2 + 165.60^2 + \\
 &\quad 165.20^2 + 165.00^2 + 164.90^2 + 165.15^2 + 164.70^2 + 165.15^2 + 164.75^2 + \\
 &\quad 165.20^2 + 165.30^2 + 165.30^2 + 165.12^2 + 165.10^2 + 165.00^2 \\
 ST &= 737097.70 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Tabel 4.13. Kuadrat data

| Percobaan | Y ² | | |
|-----------|----------------|----------|----------|
| | R1 | R2 | R3 |
| 1 | 27423,36 | 27357,16 | 27390,25 |
| 2 | 27456,49 | 27423,36 | 27357,16 |
| 3 | 27324,09 | 27357,16 | 27192,01 |
| 4 | 27274,52 | 27324,09 | 27258,01 |
| 5 | 27324,09 | 27423,36 | 27291,04 |
| 6 | 27225,00 | 27192,01 | 27274,52 |
| 7 | 27126,09 | 27274,52 | 27142,56 |
| 8 | 27291,04 | 27324,09 | 27324,09 |
| 9 | 27264,61 | 27258,01 | 27225,00 |

2. Jumlah Kuadrat Mean (Sm)

$$\begin{aligned}
 Sm &= n \times \bar{y}^2 \\
 &= 27 \times 165.23^2 = 737095.99
 \end{aligned}$$

3. Jumlah Derajat Kebebasan (Df, Df_e)

$$Df = level - 1$$

$$= 3 - 1 = 2$$

$$Df_e = VoA - \sum Df$$

$$= N - 1 - \sum Df$$

$$= 27 - 1 - 6 = 20$$

4. Jumlah Kuadrat Faktor (Sq_A, Sq_B, Sq_C, Sq_e)

$$\begin{aligned} SqA &= \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_2^2}{n_{A2}} + \frac{A_3^2}{n_{A3}} - \frac{T^2}{N} \\ &= \frac{1488.80^2}{9} + \frac{1486.70^2}{9} + \frac{1485.62^2}{9} - \frac{4461.12^2}{27} \\ &= 0.581 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SqB &= \frac{B_1^2}{n_{B1}} + \frac{B_2^2}{n_{B2}} + \frac{B_3^2}{n_{B3}} - \frac{T^2}{N} \\ &= \frac{1486.65^2}{9} + \frac{1488.60^2}{9} + \frac{1485.87^2}{9} - \frac{4461.12^2}{27} \\ &= 0.439 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SqC &= \frac{C_1^2}{n_{C1}} + \frac{C_2^2}{n_{C2}} + \frac{C_3^2}{n_{C3}} - \frac{T^2}{N} \\ &= \frac{1487.35^2}{9} + \frac{1487.47^2}{9} + \frac{1486.30^2}{9} - \frac{4461.12^2}{27} \\ &= 0.092 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sqe &= ST - Sm - SqA - SqB - SqC \\ &= 737097.70 - 737095.99 - 0.581 - 0.439 - 0.092 \\ &= 0.605 \end{aligned}$$

5. Jumlah Kuadrat Total Sesungguhnya (St)

$$\begin{aligned} St &= SqA + SqB + SqC + Sqe \\ &= 0.581 + 0.439 + 0.092 + 0.605 \\ &= 1.717 \end{aligned}$$

6. Rata-Rata Jumlah Kuadrat (Mq_A , Mq_B , Mq_C , Mq_e , Mq_t)

$$\begin{aligned}MqA &= \frac{SqA}{DfA} \\ &= \frac{0.581}{2} = 0.291\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}MqB &= \frac{SqB}{DfB} \\ &= \frac{0.439}{2} = 0.220\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}MqC &= \frac{SqC}{DfC} \\ &= \frac{0.092}{2} = 0.046\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mqe &= \frac{Sqe}{Dfe} \\ &= \frac{0.605}{20} = 0.030\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mqt &= \frac{St}{Dft} \\ &= \frac{1.717}{26} = 0.066\end{aligned}$$

7. Faktor Rasio (F-ratio)

$$\begin{aligned}F - ratio A &= \frac{MqA}{Mqe} \\ &= \frac{0.291}{0.030} = 9.61\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F - ratio B &= \frac{MqB}{Mqe} \\ &= \frac{0.220}{0.030} = 7.27\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F - ratio C &= \frac{MqC}{Mqe} \\ &= \frac{0.046}{0.030} = 1.52\end{aligned}$$

8. Jumlah Kuadrat Sesungguhnya (Sq_A' , Sq_B' , Sq_C' , Sq_e' , Sq_t')

$$\begin{aligned} SqA' &= SqA - Df \times Mqe \\ &= 0.581 - (2 \times 0.030) = 0.521 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SqB' &= SqB - Df \times Mqe \\ &= 0.439 - (2 \times 0.030) = 0.379 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SqC' &= SqC - Df \times Mqe \\ &= 0.046 - (2 \times 0.030) = 0.032 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sqe' &= St - SqA' - SqB' - SqC' \\ &= 1.717 - 0.521 - 0.379 - 0.032 = 0.786 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sqt' &= Sqe' + SqA' + SqB' + SqC' \\ &= 0.786 + 0.521 + 0.379 + 0.032 = 1.717 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \rho A &= \frac{SqA'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.521}{1.717} \times 100\% = 30.32\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho B &= \frac{SqB'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.379}{1.717} \times 100\% = 22.07\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho C &= \frac{SqC'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.032}{1.717} \times 100\% = 1.84\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho e &= \frac{Sqe'}{St} \times 100\% \\ &= \frac{0.789}{1.717} \times 100\% = 48.78\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho t &= \rho A + \rho B + \rho C + \rho e \\ &= 30.32\% + 22.07\% + 1.84\% + 48.78\% = 100\% \end{aligned}$$

10. *Probability values (P)*

Untuk mendapatkan nilai P maka perlu menggunakan tabel distribusi berdasarkan nilai *F-ratio*, derajat kebebasan (Df_1), dan derajat kebebasan error (Df_2). Pada penelitian ini, berdasarkan data dimensi LO dengan ANOVA mendapatkan hasil yang berturut – turut dari *nozzle temperature*, *extrusion width*, dan *infill density* yaitu : 0.001, 0.003, dan 0.237.

Selanjutnya hasil dari perhitungan ANOVA dimasukkan dan diklasifikasikan dalam tabel. Perhitungan tersebut juga dilakukan pada dimensi W, WO, T dan *Tensile Strength*. Pada analisis ANOVA nilai F, P (*probability value*) dan ρ (Persen kontribusi) merupakan hal yang sangat diperhatikan. Nilai F yang menggunakan perhitungan diatas merupakan nilai F-hitung, untuk itu diperlukan nilai F-tabel menggunakan tabel distribusi F yang dicari berdasarkan nilai α . Pada penelitian ini menggunakan nilai α 0.05 (5%), Nilai derajat kebebasan faktor (Df) dan derajat kebebasan *error* (Df_e) sehingga menghasilkan nilai sebesar 3,49. 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).

Nilai P (*probability value*) digunakan untuk mengetahui tingkat signifikan suatu parameter proses terhadap respon. Jika nilai P lebih besar dari nilai α (*alpha error*) maka parameter tersebut tidak signifikan mempengaruhi respon, sebaliknya jika nilai P lebih kecil dari nilai α (*alpha error*) maka parameter tersebut signifikan mempengaruhi respon. Nilai ρ (persen kontribusi) menunjukkan seberapa besar suatu parameter mempengaruhi hasil respon. Jika semakin besar nilai ρ maka semakin besar parameter tersebut berkontribusi terhadap respon, sebaliknya semakin kecil nilai ρ maka semakin kecil parameter tersebut berkontribusi terhadap respon. Berikut ini data tabel hasil perhitungan untuk dimensi LO, W, WO, T dan *Tensile strength*.

Tabel 4.14 Persen kontribusi parameter dimensi LO dengan ANOVA

| Source | Sq | Df | Mq | F-ratio | Sq' | P | $\rho\%$ |
|---------------------------|-----------|----|-------|---------|-------|-------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 0,581 | 2 | 0,291 | 9,61 | 0,521 | 0,001 | 30,32 |
| <i>Extrusion width</i> | 0,439 | 2 | 0,220 | 7,27 | 0,379 | 0,003 | 22,07 |
| <i>Infill Density</i> | 0,092 | 2 | 0,046 | 1,52 | 0,032 | 0,237 | 1,84 |
| <i>e</i> | 0,605 | 20 | 0,030 | 1,00 | 0,786 | - | 45,78 |
| <i>St</i> | 1,717 | 26 | 0,066 | - | 1,717 | - | 100 |
| Mean | 737095,99 | 2 | - | - | - | - | - |
| ST | 737097,70 | 27 | - | - | - | - | - |

Tabel 4.15 Signifikan parameter LO

| LO | F-Table | H ₀ | P-value | |
|---------------------------|---------|----------------|---------|------------------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 3,490 | Ditolak | 0,001 | Signifikan |
| <i>Extrusion Width</i> | 3,490 | Ditolak | 0,003 | Signifikan |
| <i>Infill Density</i> | 3,490 | Diterima | 0,237 | Tidak signifikan |

Berdasarkan Tabel 4.14 dapat diketahui nilai F-ratio, besar kontribusi dan pengaruh dari faktor parameter terhadap respon dimensi panjang keseluruhan (LO). Pada tabel tersebut dapat diketahui bahwa parameter *nozzle temperature* memiliki persen kontribusi yang terbesar dengan nilai 30,32% dengan parameter *infill density* sebagai parameter yang paling tidak berkontribusi dengan nilai 1,84%. Pada tabel 4.15 dapat diketahui bahwa parameter *nozzle temperature* dan *extrusion width* secara signifikan berpengaruh terhadap respon dimensi LO karena memiliki nilai P lebih kecil dari nilai α (*alpha error*). Sedangkan hanya parameter *infill density* yang secara tidak signifikan berpengaruh terhadap respon dimensi LO dengan diperkuat hipotesis (H₀) diterima maka tidak ada pengaruh perlakuan pada faktor.

Tabel 4.16 Persen kontribusi parameter dimensi WO dengan ANOVA

| Source | Sq | Df | Mq | F-ratio | Sq' | P | $\rho\%$ |
|---------------------------|---------|----|-------|---------|-------|-------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 0,149 | 2 | 0,074 | 45,87 | 0,145 | 0,000 | 45,52 |
| <i>Extrusion width</i> | 0,117 | 2 | 0,058 | 36,10 | 0,114 | 0,000 | 35,60 |
| <i>Infill Density</i> | 0,021 | 2 | 0,011 | 6,61 | 0,018 | 0,006 | 5,69 |
| <i>e</i> | 0,032 | 20 | 0,002 | 1,00 | 0,042 | - | 13,19 |
| <i>St</i> | 0,319 | 26 | 0,012 | - | 0,319 | - | 100 |
| Mean | 9766,01 | 2 | - | - | - | - | - |
| ST | 9766,33 | 27 | - | - | - | - | - |

Tabel 4.17 Signifikan parameter WO

| WO | F-Table | H ₀ | P-value | |
|---------------------------|---------|----------------|---------|------------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 3,490 | Ditolak | 0,000 | Signifikan |
| <i>Extrusion Width</i> | 3,490 | Ditolak | 0,000 | Signifikan |
| <i>Infill Density</i> | 3,490 | Ditolak | 0,006 | Signifikan |

Berdasarkan Tabel 4.16 dapat diketahui nilai F-ratio, besar kontribusi dan pengaruh dari faktor parameter terhadap respon dimensi lebar keseluruhan (WO). Pada tabel tersebut dapat diketahui bahwa parameter *nozzle temperature* memiliki persen kontribusi yang terbesar dengan nilai 45,52% dengan parameter *infill density* sebagai parameter yang paling tidak berkontribusi dengan nilai 5,69%. Pada tabel 4.17 dapat diketahui bahwa parameter *nozzle temperature*, *extrusion width* dan *Infill density* secara signifikan berpengaruh terhadap respon dimensi WO karena memiliki nilai P lebih kecil dari nilai α (*alpha error*). Sedangkan hipotesis (H₀) semuanya ditolak sehingga memperkuat bahwa parameter *nozzle temperature*, *extrusion width*, dan *infill density* sangat berpengaruh terhadap respon dimensi WO.

Tabel 4.18 persen kontribusi parameter dimensi W dengan ANOVA

| Source | Sq | Df | Mq | F-ratio | Sq' | P | $\rho\%$ |
|---------------------------|---------|----|-------|---------|-------|-------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 0,170 | 2 | 0,085 | 9,26 | 0,152 | 0,001 | 28,82 |
| <i>Extrusion width</i> | 0,134 | 2 | 0,067 | 7,28 | 0,115 | 0,004 | 21,93 |
| <i>Infill Density</i> | 0,039 | 2 | 0,019 | 2,11 | 0,020 | 0,148 | 3,87 |
| <i>e</i> | 0,184 | 20 | 0,009 | 1,00 | 0,239 | - | 45,38 |
| <i>St</i> | 0,527 | 26 | 0,020 | - | 0,527 | - | 100 |
| Mean | 4573,32 | 2 | - | - | - | - | - |
| ST | 4573,85 | 27 | - | - | - | - | - |

Tabel 4.19 Signifikan parameter W

| W | F-Table | H ₀ | P-value | |
|---------------------------|---------|----------------|---------|------------------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 3,490 | Ditolak | 0,001 | Signifikan |
| <i>Extrusion Width</i> | 3,490 | Ditolak | 0,004 | Signifikan |
| <i>Infill Density</i> | 3,490 | Diterima | 0,148 | Tidak Signifikan |

Berdasarkan Tabel 4.18 dapat diketahui nilai F-ratio, besar kontribusi dan pengaruh dari faktor parameter terhadap respon dimensi lebar tengah (W). Pada tabel tersebut dapat diketahui bahwa parameter *nozzle temperature* memiliki persen kontribusi yang terbesar dengan nilai 28,82% dengan parameter *infill density* sebagai parameter yang paling tidak berkontribusi dengan nilai 3,87%. Pada tabel 4.19 dapat diketahui bahwa parameter *nozzle temperature* dan *extrusion width* secara signifikan berpengaruh terhadap respon dimensi W karena memiliki nilai P lebih kecil dari nilai α (*alpha error*). Sedangkan hanya parameter *infill density* yang secara tidak signifikan berpengaruh terhadap respon dimensi W dengan diperkuat hipotesis (H₀) diterima maka tidak ada pengaruh perlakuan pada faktor.

Tabel 4.20 persen kontribusi parameter dimensi T dengan ANOVA

| Source | Sq | Df | Mq | F-ratio | Sq' | P | $\rho\%$ |
|---------------------------|--------|----|-------|---------|-------|-------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 0,007 | 2 | 0,004 | 1,17 | 0,001 | 0,331 | 0,54 |
| <i>Extrusion width</i> | 0,094 | 2 | 0,047 | 15,58 | 0,088 | 0,000 | 46,44 |
| <i>Infill Density</i> | 0,028 | 2 | 0,014 | 4,65 | 0,022 | 0,022 | 11,63 |
| <i>e</i> | 0,060 | 20 | 0,003 | 1,00 | 0,078 | - | 41,39 |
| <i>St</i> | 0,189 | 26 | 0,007 | - | 0,189 | - | 100 |
| Mean | 458,39 | 2 | - | - | - | - | - |
| ST | 458,58 | 27 | - | - | - | - | - |

Tabel 4.21 Signifikan parameter T

| T | F-Table | H ₀ | P-value | |
|---------------------------|---------|----------------|---------|------------------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 3,490 | Diterima | 0,331 | Tidak Signifikan |
| <i>Extrusion Width</i> | 3,490 | Ditolak | 0,000 | Signifikan |
| <i>Infill Density</i> | 3,490 | Ditolak | 0,002 | Signifikan |

Berdasarkan Tabel 4.20 dapat diketahui nilai F-ratio, besar kontribusi dan pengaruh dari faktor parameter terhadap respon dimensi tebal (T). Pada tabel tersebut dapat diketahui bahwa parameter *extrusion width* memiliki persen kontribusi yang terbesar dengan nilai 46,44% dengan parameter *nozzle temperature* sebagai parameter yang paling tidak berkontribusi dengan nilai 0,54%. Pada tabel 4.21 dapat diketahui bahwa parameter *infill density* dan *extrusion width* secara signifikan berpengaruh terhadap respon dimensi T karena memiliki nilai P lebih kecil dari nilai α (*alpha error*). Sedangkan hanya parameter *nozzle temperature* yang secara tidak signifikan berpengaruh terhadap respon dimensi LO dengan diperkuat hipotesis (H₀) diterima maka tidak ada pengaruh perlakuan pada faktor.

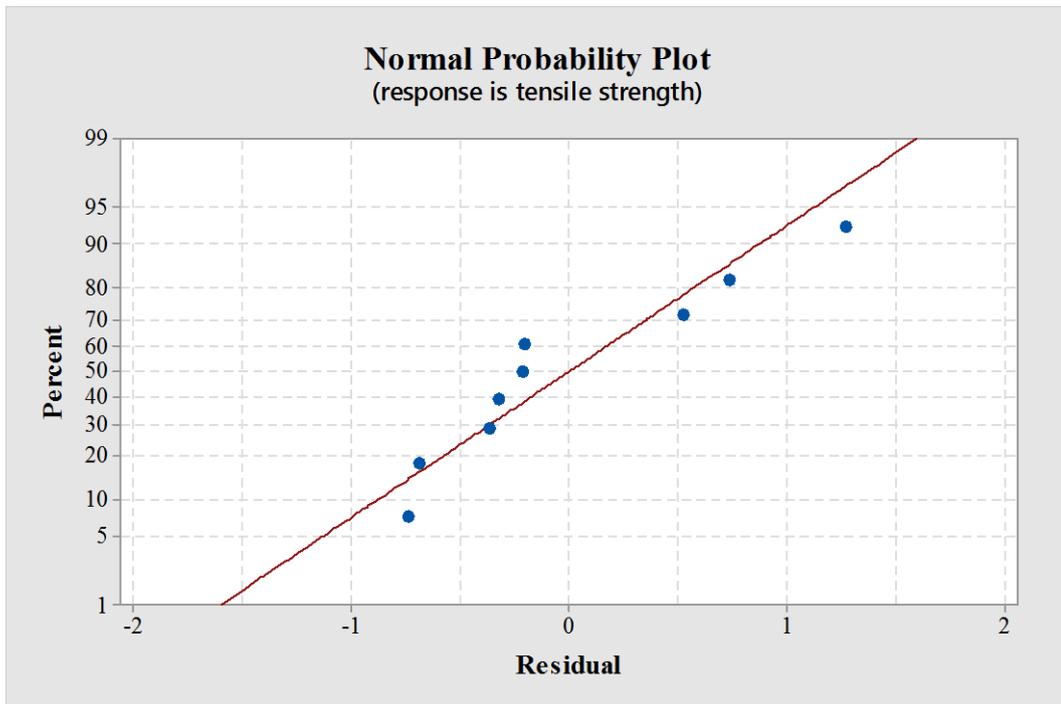
Tabel 4.22 persen kontribusi parameter TS dengan ANOVA

| <i>Source</i> | Sq | Df | Mq | F-ratio | Sq' | P | $\rho\%$ |
|---------------------------|---------|----|--------|---------|---------|-------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 9,836 | 2 | 4,918 | 2,76 | 6,274 | 0,087 | 2,86 |
| <i>Extrusion width</i> | 2,321 | 2 | 1,160 | 0,65 | -1,241 | 0,532 | -0,57 |
| <i>Infill Density</i> | 171,541 | 2 | 85,771 | 48,17 | 167,980 | 0,000 | 76,59 |
| <i>e</i> | 35,615 | 20 | 1,781 | 1,00 | 46,300 | - | 21,11 |
| <i>St</i> | 219,313 | 26 | 8,435 | - | 219,313 | - | 100 |
| Mean | 8133,64 | 2 | - | - | - | - | - |
| ST | 8352,95 | 27 | - | - | - | - | - |

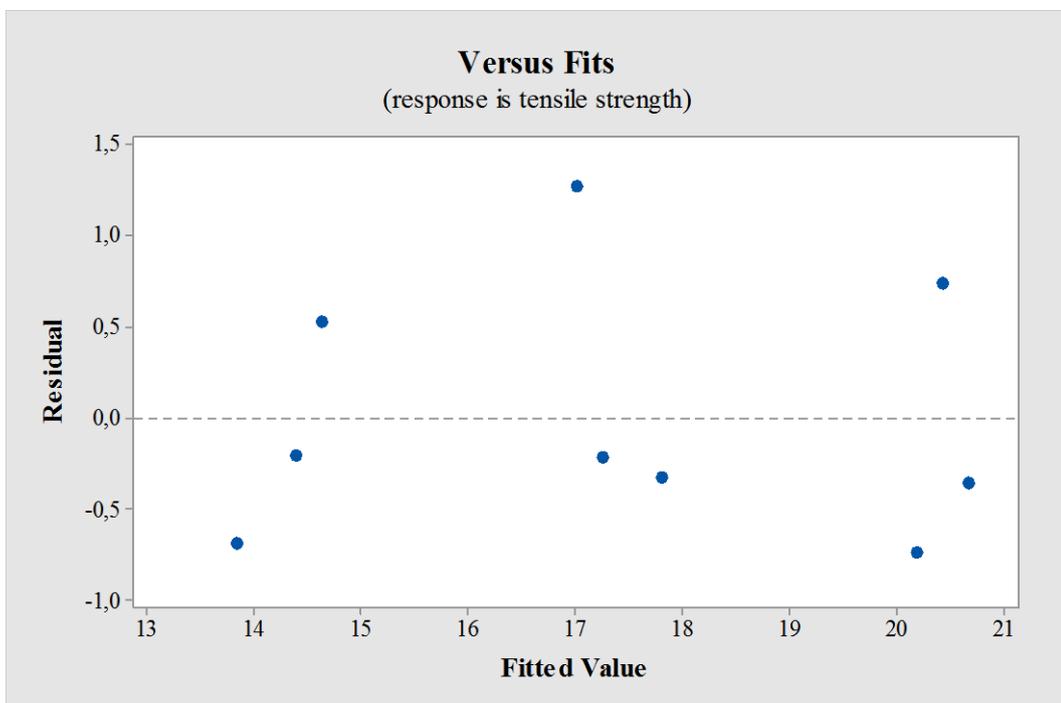
Tabel 4.23 Signifikan parameter TS

| TS | F-Table | H ₀ | P-value | |
|---------------------------|---------|----------------|---------|------------------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 3,490 | Diterima | 0,087 | Tidak Signifikan |
| <i>Extrusion Width</i> | 3,490 | Diterima | 0,532 | Tidak Signifikan |
| <i>Infill Density</i> | 3,490 | Ditolak | 0,000 | Signifikan |

Berdasarkan Tabel 4.22 dapat diketahui nilai F-ratio, besar kontribusi dan pengaruh dari faktor parameter terhadap respon nilai tegangan tarik (TS). Pada tabel tersebut dapat diketahui bahwa parameter *infill density* memiliki persen kontribusi yang terbesar dengan nilai 76,59% dengan parameter *extrusion width* sebagai parameter yang paling tidak berkontribusi dengan nilai -0,57%. Pada tabel 4.23 dapat diketahui bahwa parameter *nozzle temperature* dan *extrusion width* secara tidak signifikan berpengaruh terhadap respon tegangan tarik (TS) karena memiliki nilai P lebih besar dari nilai α (*alpha error*). Sedangkan hanya parameter *infill density* yang secara signifikan berpengaruh terhadap tegangan tarik TS dengan diperkuat hipotesis (H₀) ditolak maka ada pengaruh perlakuan pada faktor.



Gambar 4.12 Normal Probability Plot dari *tensile strength*.



Gambar 4.13. Versus fits dari *tensile strength*.

Berdasarkan gambar 4.12 hasil dari kurva yang didapat adalah normal, karena data yang terdistribusi mendekati garis atau membentuk pola segaris.

Selanjutnya pada gambar 4.13 data yang didapatkan tidak membentuk *pattern* tertentu dan terlihat acak sehingga data yang didapatkan pada penelitian ini terbukti normal dan memiliki variasi yang konstan.

4.4. Analisis Parameter Optimum

Berdasarkan analisis parameter menggunakan SNR nilai delta sebagai nilai untuk menentukan urutan dan berdasarkan analisis parameter menggunakan ANOVA nilai respon kontribusi sebagai acuan untuk menentukan urutan untuk mengetahui urutan pengaruh terhadap respon dimensi dan tegangan tarik. Berikut ini tabel parameter proses yang optimum berdasarkan SNR dan ANOVA.

Tabel 4.24. Parameter proses optimum berdasarkan SNR

| <i>Rank</i> | Dimensi LO | Dimensi WO | Dimensi W | Dimensi T | <i>Tensile strength</i> |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | <i>Infill density</i> | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Infill density</i> | <i>Infill density</i> |
| 2 | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Nozzle temperature</i> |
| 3 | <i>Extrusion width</i> | <i>Infill density</i> | <i>Infill density</i> | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Extrusion width</i> |

Tabel 4.25. Parameter proses optimum berdasarkan ANOVA

| <i>Rank</i> | Dimensi LO | Dimensi WO | Dimensi W | Dimensi T | <i>Tensile strength</i> |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Infill density</i> |
| 2 | <i>Extrusion Width</i> | <i>Extrusion Width</i> | <i>Extrusion width</i> | <i>Infill density</i> | <i>Nozzle temperature</i> |
| 3 | <i>Infill density</i> | <i>Infill density</i> | <i>Infill density</i> | <i>Nozzle temperature</i> | <i>Extrusion width</i> |

Berdasarkan tabel parameter proses optimum menggunakan SNR dan ANOVA di atas, memiliki hasil urutan yang berbeda-beda namun secara keseluruhan parameter *nozzle temperature* merupakan parameter yang berpengaruh atau yang optimum terhadap dimensi panjang keseluruhan (LO), lebar keseluruhan (WO), dan lebar tengah (W). Sedangkan pada dimensi T berdasarkan SNR parameter *extrusion width* menjadi peringkat pertama sebagai

parameter yang berpengaruh. Pada *tensile strength* berdasarkan ANOVA parameter yang berpengaruh atau yang optimum adalah parameter *Infill density* hal ini dikarenakan semakin besar tingkat kerapatan dari suatu produk maka semakin besar nilai massa dan semakin besar nilai kekuatan tarik yang dihasilkan. Pada penelitian ini parameter *nozzle temperature* ditetapkan sebagai parameter proses yang paling berpengaruh terhadap respon dimensi sedangkan parameter *infill density* sebagai parameter yang berpengaruh terhadap respon kekuatan tarik.

Untuk mengetahui tingkat akurasi produk diperlukan perhitungan pada dimensi *error*. Perhitungan dimensi *error* yang paling sederhana adalah dengan menghitung selisih ukuran produk hasil pencetakan 3D *printing* dengan ukuran standar sesuai ASTM D638 tipe I. perhitungan dimensi *error* adalah sebagai berikut.

Diketahui : $D_1 = \text{Dimensi Produk}$

$D_2 = \text{Dimensi Standar}$

Ditanya : $\Delta D = \dots?$

Jawab : $\Delta D = D_1 - D_2$

$$= 165,5 - 165$$

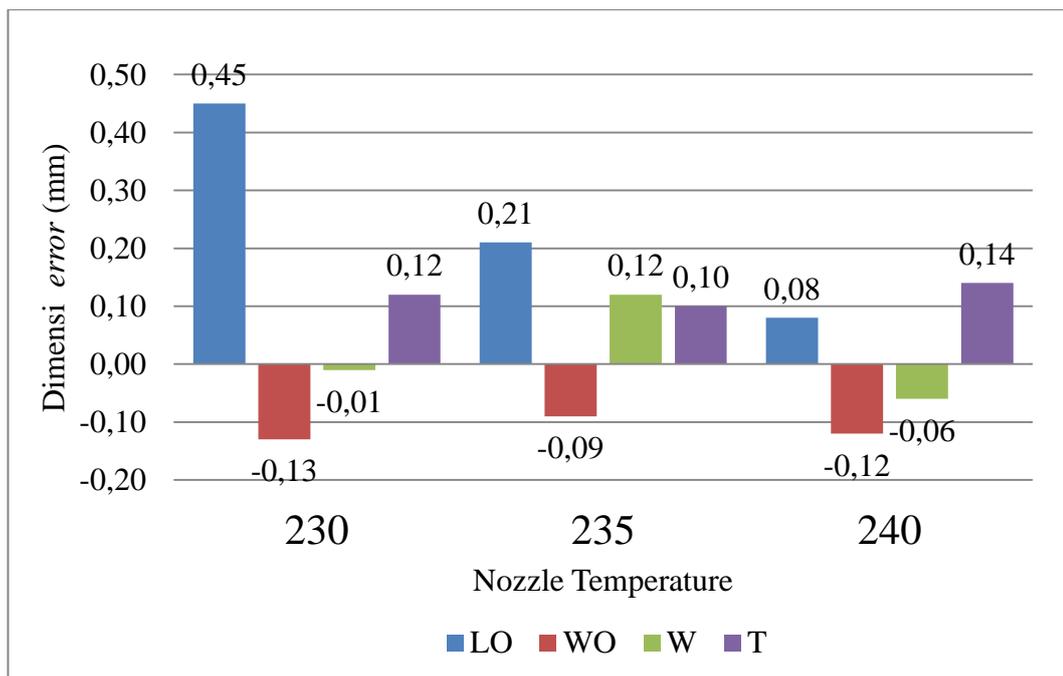
$$= 0,5$$

Selanjutnya selisih produk dari dimensi LO, WO, W, dan T dihitung dan dimasukkan dalam tabel untuk mendapatkan nilai rata – rata dan ditampilkan dalam bentuk grafik. Berikut ini tabel hasil perhitungan selisih produk dan grafik.

Tabel 4.26 Hasil perhitungan selisih produk

| <i>Nozzle Temperature</i> | LO | WO | W | T |
|---------------------------|------|-------|-------|------|
| 230 °C | 0,50 | -0,08 | 0,08 | 0,01 |
| | 0,57 | -0,13 | 0,04 | 0,10 |
| | 0,27 | -0,19 | -0,15 | 0,25 |
| Rata – Rata | 0,45 | -0,13 | -0,01 | 0,12 |
| 235 °C | 0,18 | -0,13 | 0,16 | 0,05 |
| | 0,30 | -0,06 | 0,16 | 0,14 |
| | 0,15 | -0,07 | 0,05 | 0,11 |
| Rata – Rata | 0,21 | -0,09 | 0,12 | 0,10 |

| <i>Nozzle Temperature</i> | LO | WO | W | T |
|---------------------------|-------|-------|-------|------|
| 240 °C | -0,02 | -0,08 | -0,10 | 0,08 |
| | 0,20 | -0,07 | 0,05 | 0,12 |
| | 0,07 | -0,20 | -0,14 | 0,22 |
| Rata - Rata | 0,08 | -0,12 | -0,06 | 0,14 |

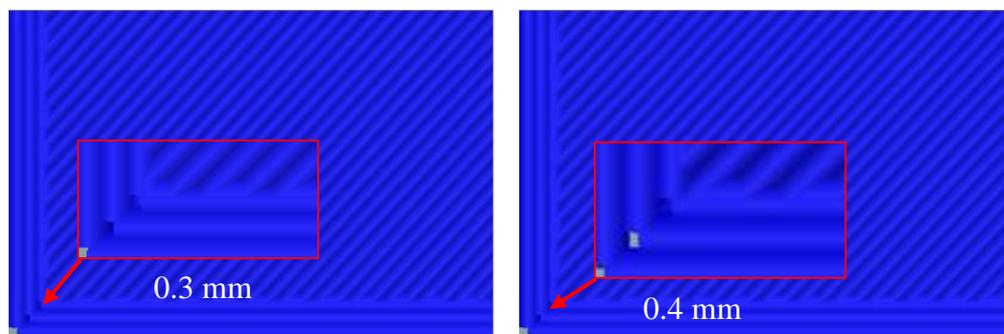


Gambar 4.14 Efek *nozzle temperature* terhadap dimensi *error*

Berdasarkan tabel 4.26 dan gambar 4.14 ditunjukkan nilai dimensi *error* dengan variasi kenaikan dan penurunan, namun terdapat penurunan nilai *error* yang cukup signifikan pada dimensi panjang keseluruhan (LO). Jika pada suhu 230°C nilai rata - rata *error* pada dimensi LO 0,45 sedangkan pada suhu 240°C nilai rata – rata *error* pada dimensi LO sebesar 0,08. Hal ini dapat terjadi dikarenakan semakin besar suhu maka semakin cair filament pada saat diekstrusi sehingga proses pencetakannya akan semakin baik. Namun pada dimensi WO, W, dan T terjadi variasi kenaikan dan penurunan nilai rata – rata *error*, hal ini dapat terjadi karena pada saat proses pencetakan produk 3D *printing* alat yang digunakan mengalami proses yang tidak stabil dengan adanya kecepatan penyusutan yang sulit untuk mencetak produk yang benar – benar mendekati

sempurna, sehingga beberapa kecacatan produk diabaikan. Hasil parameter *nozzle temperature* yang optimum pada penelitian ini yaitu pada nilai 235°C namun bahan ABS dapat dipanaskan sampai suhu 260°C sehingga masih perlu dikembangkan lagi untuk mendapatkan nilai yang optimum.

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). Pada penelitian ini parameter *extrusion width* yang paling baik berdasarkan analisis SNR dengan nilai 0,4 mm. hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar nilai *extrusion width* maka semakin kuat ikatan nya. Hal ini diperkuat dengan nilai kekuatan tarik pada percobaan ketiga dengan nilai rata – rata kekuatan tarik sebesar 20,32 Mpa meskipun nilai tersebut tidak menjadi nilai kekuatan tarik terbesar. Berikut ini perbandingan parameter *extrusion width* pada nilai 0,3 dan 0,4.

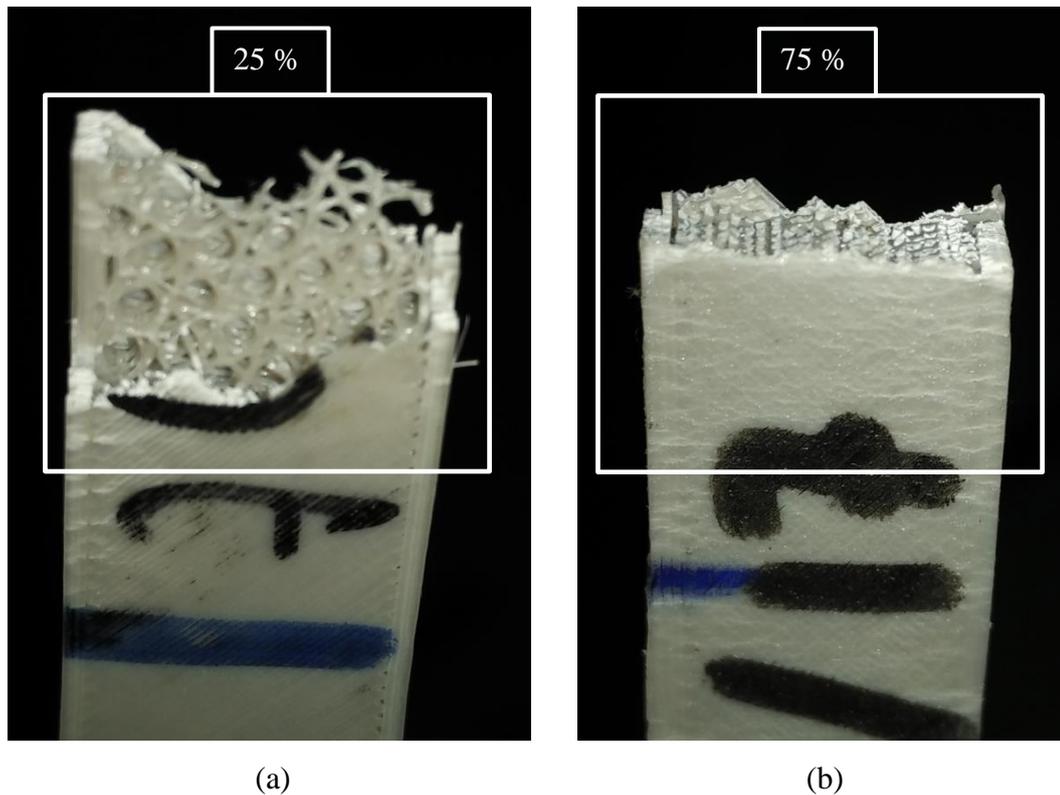


Gambar 4.15. Perbandingan *gap* pada hasil *slicing*

Berdasarkan gambar 4.15 di atas perbandingan *gap* atau celah pada produk hasil 3D *printing* mengakibatkan perbedaan kekuatan ikatan. Pada parameter *extrusion width* dengan nilai 0,3 memiliki permukaan yang lebih halus atau lebih baik karena memiliki nilai penyimpangan produk yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai 0,4.

Pada bahan ABS dengan parameter *infill density* yang semakin besar maka nilai kekuatan tarik akan semakin besar dengan massa yang semakin besar dan waktu pencetakan yang semakin lama. Perbedaan nilai parameter ini tidak

memiliki pengaruh yang besar terhadap respon dimensi. Semakin besar nilai parameter *infill density* juga mengakibatkan hasil uji tarik dari produk semakin terlihat rapi atau segaris, hal ini akan diperlihatkan pada gambar 2.16 dengan membandingkan hasil uji tarik dengan parameter *infill density* 25% dengan 75%.



Gambar 4.16 (a) dan (b) Patahan hasil uji tarik

Berdasarkan gambar 4.17 hasil uji tarik dari spesimen yang menggunakan parameter *infill density* 25% memiliki hasil patahan yang kurang rapi, hal ini mengindikasikan bahwa nilai parameter tersebut kurang optimum dan bahkan tidak disarankan untuk digunakan sebagai nilai parameter pembuatan suatu produk. Berikut ini tabel 4.27 menunjukkan hasil *tensile strength* yang optimum berdasarkan analisis SNR.

Tabel 4.27. Parameter proses dan level optimum untuk respon kekuatan tarik

| Parameter Proses | Level Optimum |
|---------------------------|---------------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 235 °C |
| <i>Extrusion Width</i> | 0.4 mm |
| <i>Infill Density</i> | 75 % |

Berdasarkan tabel 4.27 dapat diketahui level yang optimum untuk respon kekuatan tarik, namun level parameter tersebut tidak ada pada DOE yang sudah dilakukan percobaan sehingga hal ini harus dilakukan eksperimen konfirmasi dengan membuat produk sesuai level optimum pada tabel 4.27.

4.5. *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 (0,05;2;20) sebesar 3,49 dan nilai P pada $\alpha : 0,05$, 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 kudrat) terkecil sampai memiliki setengah dari nilai Df (derajat kebebasan). Pada penelitian ini matrik orthogonal yang digunakan adalah $L_9 (3^3)$ dengan Df sebanyak 6 maka *pooling* dilakukan hingga Df berjumlah 3 atau menghilangkan satu parameter proses, selanjutnya memasukkan nilai Sq dan Df pada faktor *error*. Parameter proses dengan Sq terkecil yaitu *extrusion width* (SqB) sebesar 2,321. Pada tahap ini parameter proses yang tidak signifikan diasumsikan menjadi bagian dari faktor *error* atau dianggap tidak ada dalam analisis varians. Berikut ini perhitungan *pooling* faktor *error* :

1. $Sq (pooled e) = Se + Sq_B$
 $= 35,615 + 2,321 = 37,936$
2. $Df (pooled e) = Df_e + Df_B$
 $= 20 + 2 = 22$

Selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap M_q , S_q' dan $\rho\%$ pada parameter proses yang tersisa. Berikut ini tabel hasil perhitungan *pooling* pada respon *tensile strength*

Tabel 4.28. Hasil Perhitungan ANOVA akhir

| <i>Source</i> | Sq | Df | Mq | F-ratio | Sq' | P | $\rho\%$ |
|---------------------------|---------|----|--------|---------|---------|-------|----------|
| <i>Nozzle Temperature</i> | 9,836 | 2 | 4,918 | 2,85 | 6,388 | 0,079 | 2,91 |
| <i>Infill Density</i> | 171,541 | 2 | 85,771 | 49,74 | 168,093 | 0,000 | 76,65 |
| <i>e</i> | 37,936 | 22 | 1,781 | 1,00 | 44,830 | - | 20,44 |
| <i>St</i> | 219,310 | 26 | 8,435 | - | 219,310 | - | 100 |
| Mean | 8133,64 | 2 | - | - | - | - | - |
| ST | 8352,95 | 27 | - | - | - | - | - |

4.6. Rata – Rata Prediksi dan Interval Kepercayaan

Perhitungan rata-rata prediksi atau μ terhadap nilai tegangan tarik bertujuan untuk memperkirakan nilai tegangan tarik yang didasarkan dari kombinasi level parameter optimum. Pada nilai μ 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 α : 0.05 yang berarti 95% dari rata-rata hasil akan berada di antara interval yang ditentukan. Nilai α : 0.05 digunakan untuk mencari nilai F-tabel pada tabel distribusi F yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan CI. Berikut adalah perhitungan nilai μ dan CI.

Diketahui:

| | |
|-------------------------|---------------------|
| \bar{Y} | : 17.36 MPa |
| \bar{A}_3 | : 18.21 MPa |
| \bar{B}_2 | : 17.65 MPa |
| \bar{C}_3 | : 20.32 MPa |
| $F_{(0.05;1;22)}$ | : 4.30 |
| $MSe_{(pooled\ e\ TS)}$ | : 1.724 |
| N | : $9 \times 3 = 27$ |
| Df_{μ} | : 1 |
| Df faktor | : 6 |

Ditanya:

a. $\mu_{\text{prediksi TS}}$

b. CI

Penyelesaian:

a. $\mu_{\text{prediksi TS}}$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{prediksi}} &= \bar{y} + (\bar{A}_2 - \bar{y}) + (\bar{B}_3 - \bar{y}) + (\bar{C}_3 - \bar{y}) \\ &= 17.36 + (18.21 - 17.36) + (17.65 - 17.36) \\ &\quad + (20.32 - 17.36) = 21.45 \text{ MPa}\end{aligned}$$

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

$$n_{\text{eff}} = \frac{N}{Df_{\mu} + Df_A + Df_B + Df_C + 1}$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{27}{1+6} = \frac{27}{7} = 3,857143$$

$$\text{CI} = \pm \sqrt{4.30 \times 1.724 \times \left(\frac{1}{3,857143}\right)} = \pm 1.386$$

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

$$\mu_{\text{prediksi}} - \text{CI} \leq \mu_{\text{prediksi}} \leq \mu_{\text{prediksi}} + \text{CI}$$

$$21.45 - 1.386 \leq 21.45 \leq 21.45 + 1.386$$

$$20.0598 \text{ MPa} \leq 21.45 \text{ MPa} \leq 22.83248 \text{ MPa}$$

4.7. Hasil dan Analisis Eksperimen Konfirmasi

Pada tahap eksperimen konfirmasi diperlukan data analisis prediksi untuk memperkirakan nilai tegangan tarik yang akan didapatkan. Selanjutnya pada analisis eksperimen konfirmasi dilakukan pembuatan spesimen yaitu satu kali percobaan dengan tiga kali pengulangan, berikut ini hasil dari eksperimen konfirmasi.



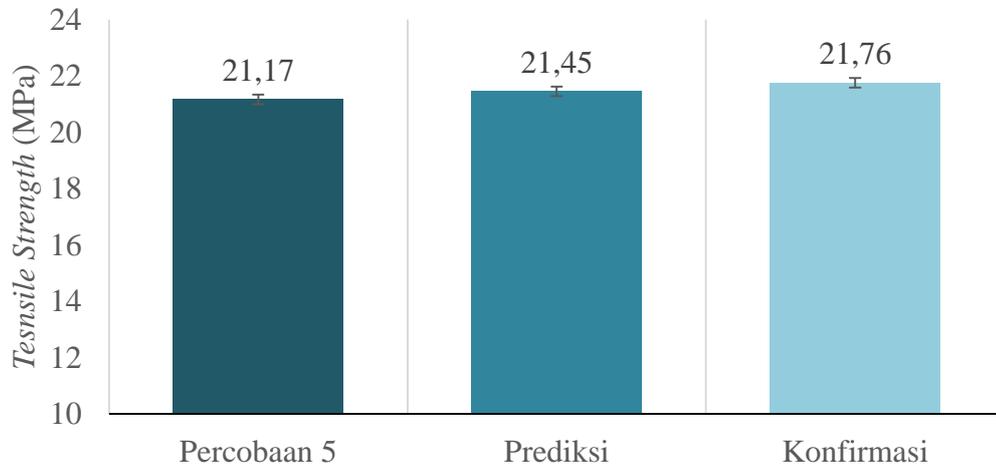
Gambar 4.17. Spesimen eksperimen konfirmasi setelah uji tarik

Pada gambar 4.17 diatas terlihat potongan atau patahan setelah pengujian tarik masih didalam *gage length* dengan jarak 5 cm. Sehingga hal tersebut masih dianggap aman dan sesuai dengan harapan. Berikut ini nilai *tensile strength* pada spesimen eksperimen konfirmasi setelah dilakukan uji tarik dan perhitungan.

Tabel 4.29 Hasil pengujian tarik dari eksperimen konfirmasi

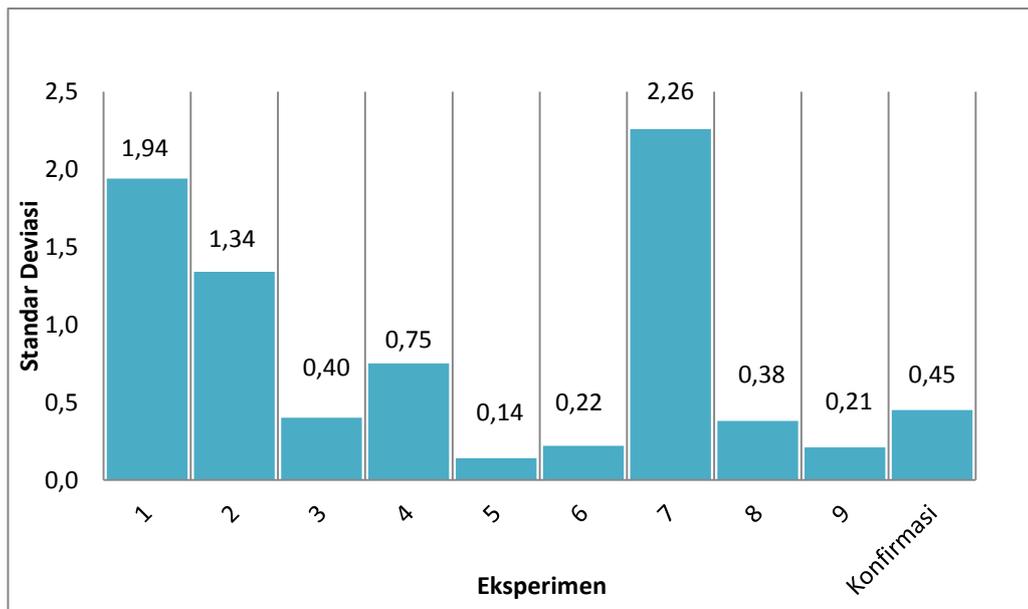
| Spesimen | F_{max} (Kgf) | Δx (mm) | Luas (mm^2) | <i>Tensile strength</i> (MPa) | Rata rata (MPa) | Standar deviasi |
|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|
| A | 115,627 | 7,36 | 52,66 | 21,53 | 21,76 | 0,45 |
| B | 116,376 | 7,96 | 53,46 | 21,34 | | |
| C | 120,793 | 7,32 | 52,82 | 22,42 | | |

Berdasarkan tabel 4.29 dapat diketahui nilai *tensile strength* yang didapatkan sebesar 21,76 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan tarik dari eksperimen konfirmasi melebihi nilai prediksi dimana hasil berada pada interval kepercayaan dan prediksi sehingga nilai tegangan tarik tersebut memenuhi syarat tingkat kepercayaan sebesar 95%. Berikut ini diagram batang perbandingan nilai tegangan tarik terbesar, prediksi dan hasil eksperimen konfirmasi.



Gambar 4.18. Diagram batang perbandingan nilai tegangan tarik

Berdasarkan diagram diatas, menunjukkan hasil perbandingan nilai tegangan tarik dimana percobaan ke 5 sebagai nilai terkecil dengan nilai 21,17 MPa. Pada diagram tersebut juga menunjukkan bahwa hasil eksperimen konfirmasi melebihi nilai prediksi dan juga nilai percobaan ke 5 sehingga hal tersebut membuktikan bahwa level parameter eksperimen konfirmasi merupakan level parameter yang optimum. Berikut ini perbandingan nilai standar deviasi dari nilai tegangan tarik semua percobaan.



Gambar 4.19 diagram batang perbandingan nilai standar deviasi

Berdasarkan diagram batang diatas menunjukkan bahwa nilai standar deviasi dari semua percobaan atau eksperimen memiliki tingkat variasi data yang berbeda – beda dengan nilai standar deviasi terkecil pada percobaan kelima. Nilai standar deviasi pada eksperimen konfirmasi lebih besar dibandingkan dengan percobaan kelima hal ini dikarenakan pada eksperimen konfirmasi memiliki nilai tegangan tarik, dimensi dan hasil patahan yang bervariasi. Jika dibandingkan dengan nilai tegangan tarik, hasil dari eksperimen konfirmasi lebih besar dibandingkan dengan percobaan kelima sehingga optimasi parameter yang dihasilkan menggunakan metode taguchi terbukti dapat meningkatkan kualitas produk pada kekuatan tarik. Waktu yang dibutuhkan dalam pembuatan produk juga dapat dipercepat sehingga biaya yang dikeluarkan akan semakin sedikit. Kemudian hasil dari kombinasi level parameter juga dapat digunakan untuk mendesain sebuah produk yang ringan dan hemat material, karena hasil cetakan tidak sepenuhnya terisi oleh material.

