

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL BAHASA INDONESIA	i
HALAMAN JUDUL BAHASA INGGRIS	ii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR	vi
KATA PENGANTAR	vii
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xix
INTISARI	xx
ABSTRACT	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Asumsi dan Batasan Masalah	5
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7

BAB III LANDASAN TEORI	11
3.1. <i>Additive Manufacturing</i>	11
3.2. Flexible Strain Sensor	13
3.3. Kirigami	15
3.4. <i>Design of Experiment</i>	16
3.5. Analisis Statistika	17
3.5.1. Analisis Taguchi	17
3.5.2. Uji ANOVA	18
3.5.3. <i>Grey Relational Analysis</i>	20
3.5.4. <i>Response Surface Method</i>	20
BAB IV METODE PENELITIAN	25
4.1. Objek Penelitian	25
4.2. Bahan Penelitian	25
4.3. Alat Penelitian	27
4.4. Alur Penelitian	30
4.4.1. Studi Literatur	31
4.4.2. Persiapan Alat dan Bahan	31
4.4.3. <i>Pilot Study</i>	31
4.4.4. Penentuan Desain Eksperimen	35
4.4.5. Pembuatan Desain Sensor	39
4.4.6. Pengambilan Data	41
4.4.7. Optimasi Faktor Penelitian	46
4.4.8. Validasi	48
4.4.9. Interpretasi Hasil	49
4.4.10. Pengambilan Kesimpulan	49

5.1. Hasil <i>Design of Experiment</i> (DoE)	50
5.2. Hasil Analisis	70
5.2.1. Uji Normalitas dan Homogenitas	70
5.2.2. ANOVA	73
5.2.3. Analisis <i>Response Surface Method</i>	81
5.3. Validasi Hasil	88
5.3.1. Validasi	88
5.3.2. Perbandingan Hasil Optimasi	93
5.3.3. Analisis Sensitivitas	97
5.4. Pembahasan Hasil Analisis	100
5.4.1. Pengaruh Desain Sensor	100
5.4.2. Pengaruh Rasio Dimensi	100
5.4.3. Pengaruh Ketebalan Sensor	101
5.4.4. Pengaruh <i>Substrate</i>	102
5.4.5. Perbandingan Hasil Penelitian	103
BAB VI PENUTUP	105
6.1. Kesimpulan	105
6.2. Saran	106
DAFTAR PUSTAKA	107
LAMPIRAN	114

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. <i>Market Size</i> dari <i>Flexible Strain Sensor</i>	2
Gambar 3.1. Mekanisme Kerja FDM (Mohamed et al., 2015)	12
Gambar 3.2. Bagian <i>Flexible Strain Sensor</i> (Gunes et al., 2025)	13
Gambar 3.3. Jenis Kirigami (Sun et al. 2021)	15
Gambar 4.1. Filamen TPU merek eSun	26
Gambar 4.2. TPU <i>Film</i> merek Fanchi	26
Gambar 4.3. <i>Conductive</i> TPU merek Reprapper	26
Gambar 4.4. <i>Conductive Paint</i> merek Ranstechnology	26
Gambar 4.5. Flexible Sealant merek Dextone	27
Gambar 4.6. Mesin FDM 3D <i>Printer</i> merek Ender 3 Max	28
Gambar 4.7. <i>Universal Testing Machine</i> merek Hung Ta SF063B	28
Gambar 4.8. <i>Multimeter</i> merek ANENG DT-830B	29
Gambar 4.9. Penggaris 30 cm merek Kenko	29
Gambar 4.10. Jangka Sorong merek Mitutoyo	29
Gambar 4.11. Kuas Busa 25 mm merek V-Tec	29
Gambar 4.12. Kuas Bulu 12 mm merek Faber Castell	30
Gambar 4.13. Alur Penelitian	30
Gambar 4.14. Desain strain sensor berbasis pola Kirigami. (a) Desain A (Wang et al., 2021) (b) Desain B (Gu et al., 2024) (c) Desain C (Kim et al., 2022)	32
Gambar 4.15. Desain strain sensor oleh (Wang et al., 2021) ($L1 = 15$ mm, $L2 = 13$ mm, $W1 = 4.5$ mm, $W2 = 1.5$ mm)	33
Gambar 4.16. Desain sensor untuk <i>pilot study</i> . (a) Desain <i>sensing film</i> (b) Desain <i>sensor substrate</i>	34
Gambar 4.17. <i>Design of Experiment</i> Penelitian	37
Gambar 4.18. Desain Sensor Eksperimen No. 2 (Desain B, Rasio 0.15, Ketebalan 0.8 mm)	39
Gambar 4.19. Desain Sensor Eksperimen No. 8 (Desain C, Rasio 0.07, Ketebalan 0.245 mm)	40

Gambar 4.20. Desain Sensor Eksperimen No. 2 (Desain A, Rasio 0.0935, Ketebalan 0.416 mm)	40
Gambar 4.21. CAD <i>Sensor Substrate</i>	40
Gambar 4.22. Tampilan Ultimaker Cura 5.8.1	41
Gambar 4.23. Pencetakan Sensing film	42
Gambar 4. 24. Pengecatan Sensor	42
Gambar 4.25. Pencetakan <i>Printed Substrate</i>	43
Gambar 4.26. Hasil Pencetakan <i>Printed Substrate</i>	43
Gambar 4.27. TPU <i>Film</i> yang Sudah Dipotong	43
Gambar 4.28. Perekatan <i>Sensing Film</i> dengan <i>Sensor Substrate</i>	44
Gambar 4.29. Dimensi yang Diukur pada Uji Akurasi Dimensi	44
Gambar 4.30. Pengukuran Resistansi	45
Gambar 4. 31. Pengujian Tarik. (a) <i>Flexible strain sensor</i> sebelum diuji tarik (b) Pemasangan sensor pada mesin (c) Proses uji tarik (d) Kerusakan pada sensor (e) <i>Flexible strain sensor</i> setelah diuji tarik	45
Gambar 4.32. Tahap Pertama Analisis RSM	46
Gambar 4.33. Tahap Kedua Analisis RSM	46
Gambar 4.34. Tahap Ketiga Analisis RSM	47
Gambar 4.35. Tahap Keempat Analisis RSM	47
Gambar 4.36. Pengisian Hasil Pengambilan Data	48
Gambar 4.37. Proses Analisis RSM	48
Gambar 5.1. Hasil Pencetakan <i>Flexible Strain Sensor</i> . (a) Eksperimen Nomor 16 (b) Eksperimen Nomor 7 (c) Eksperimen Nomor 8	50
Gambar 5.2. Grafik Uji Tarik Salah Satu Eksperimen (dari Aplikasi UTM)	70
Gambar 5.3. <i>Plot</i> Hasil Uji Normalitas Respons <i>Gauge Factor</i> Sebelum Transformasi	71
Gambar 5.4. <i>Plot</i> Hasil Uji Normalitas Respon Deviasi Dimensi Sebelum Transformasi	71
Gambar 5.5. Rekomendasi Transformasi Respons <i>Gauge Factor</i>	72

Gambar 5.6. <i>Plot</i> Hasil Uji Normalitas Respon <i>Gauge Factor</i> Setelah Transformasi	72
Gambar 5.7. <i>Plot</i> Hasil Uji Normalitas Respon Deviasi Dimensi Setelah Transformasi	72
Gambar 5.8. Salah Satu Hasil Uji Homogenitas	73
Gambar 5. 9. Grafik <i>Contour</i> Respons <i>Build Time</i> . (a) Desain A (b) Desain B (c) Desain C	82
Gambar 5.10. Grafik <i>Contour</i> Respons Deviasi Dimensi. (a) Desain A (b) Desain B (c) Desain C	83
Gambar 5.11. Grafik <i>Contour</i> Respons <i>Gauge Factor</i> tanpa Mempertimbangkan <i>Substrate</i> . (a) Desain A (b) Desain B (c) Desain C	84
Gambar 5.12. Grafik <i>Contour</i> Respons <i>Gauge Factor</i> tanpa Mempertimbangkan Desain Sensor. (a) <i>Printed Substrate</i> (b) <i>TPU Film</i>	84
Gambar 5.13. Grafik <i>Contour</i> Respons Elongasi tanpa Mempertimbangkan <i>Substrate</i> . (a) Desain A (b) Desain B (c) Desain C	85
Gambar 5.14. Grafik <i>Contour</i> Respons Elongasi tanpa Mempertimbangkan Desain Sensor. (a) <i>Printed Substrate</i> (b) <i>TPU Film</i>	86
Gambar 5.15. Grafik <i>Error Chart Build Time</i> (a) Perbandingan dengan Prediksi (b) Standar Deviasi dari Rata-Rata	90
Gambar 5.16. Grafik <i>Error Chart</i> Deviasi Dimensi	91
Gambar 5.17. Grafik <i>Error Chart Gauge Factor</i>	91
Gambar 5.18. Grafik <i>Error Chart</i> Elongasi	92
Gambar 5.19. Perubahan Nilai <i>Gauge Factor</i>	92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Peta Penelitian	10
Tabel 3.1. Karakteristik Metode Taguchi (Hisam et al., 2024)	17
Tabel 3.2. Rumus pada Uji ANOVA (Canbolat et al., 2019)	18
Tabel 3.3. Persamaan pada GRA (Canbolat et al., 2019)	20
Tabel 3.4. Persamaan pada RSM	20
Tabel 3.5. Perbandingan Metode pada RSM	23
Tabel 4.1. Faktor Penelitian	37
Tabel 4.2. Desain Eksperimen	38
Tabel 5.1. <i>Build Time</i> Tiap Eksperimen	50
Tabel 5.2. Hasil Deviasi Dimensi	54
Tabel 5.3. Rata-Rata Hasil Deviasi Dimensi	58
Tabel 5.4. Hasil Pengukuran Sensitivitas	63
Tabel 5.5. Hasil Pengukuran Elongasi	67
Tabel 5.6. Hasil Analisis ANOVA Respons <i>Build Time</i>	74
Tabel 5.7. Fit Statistics Respons <i>Build Time</i>	74
Tabel 5.8. Persamaan Respons <i>Build Time</i>	75
Tabel 5.9. Hasil Analisis ANOVA Respons Deviasi Dimensi	76
Tabel 5.10. Persamaan Respons Deviasi Dimensi	76
Tabel 5.11. Hasil Analisis ANOVA Respons <i>Gauge Factor</i>	78
Tabel 5.12. <i>Fit Statistics</i> Respons <i>Gauge Factor</i>	78
Tabel 5.13. Persamaan Respons <i>Gauge Factor</i>	79
Tabel 5.14. Hasil Analisis ANOVA Respons Elongasi	79
Tabel 5.15. <i>Fit Statistics</i> Respons Elongasi	80
Tabel 5.16. Persamaan Respons Elongasi	80
Tabel 5.17. Kriteria Optimasi pada Aplikasi Design Expert 13	87
Tabel 5.18. Nilai Faktor Hasil Optimasi	87
Tabel 5.19. Prediksi Nilai Respons Hasil Optimasi	88
Tabel 5.20. Hasil Eksperimen Optimasi	89
Tabel 5.21. Perbandingan Nilai <i>Build Time</i>	93

Tabel 5.22. Perbandingan Nilai Deviasi Dimensi	94
Tabel 5.23. Perbandingan Nilai <i>Gauge Factor</i>	95
Tabel 5.24. Perbandingan Nilai Elongasi	96
Tabel 5.25. Perbandingan <i>Desirability</i>	96
Tabel 5.26. Kriteria Analisis Sensitivitas Kondisi Pertama	97
Tabel 5.27. Faktor Hasil Optimasi Analisis Sensitivitas Kondisi Pertama	98
Tabel 5.28. Prediksi Respons Analisis Sensitivitas Kondisi Pertama	98
Tabel 5.29. Faktor Hasil Optimasi Analisis Sensitivitas Kondisi Kedua	99
Tabel 5.30. Prediksi Respons Analisis Sensitivitas Kondisi Kedua	99
Tabel 5.31. Faktor Hasil Optimasi Analisis Sensitivitas Kondisi Ketiga	99
Tabel 5.32. Prediksi Respons Analisis Sensitivitas Kondisi Ketiga	99
Tabel 5.33. Perbandingan <i>Sensing Performance</i> dengan Penelitian Sebelumnya	103

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pencetakan <i>Pilot Study</i>	114
Lampiran 2. Hasil Pengukuran Resistansi <i>Pilot Study</i>	114
Lampiran 3. Proses Pengukuran Dimensi <i>Interval</i>	115
Lampiran 4. Parameter pada Ultimaker Cura 5.8.1	116
Lampiran 5. Hasil Pencetakan <i>Flexible Strain Sensor</i>	118
Lampiran 6. Hasil Pengukuran Deviasi Dimensi	124
Lampiran 7. Hasil Uji Normalitas pada Aplikasi Minitab 16	128
Lampiran 8. Hasil Transformasi Respons Deviasi Dimensi dan GF	129
Lampiran 9. Hasil Uji Homogenitas	130
Lampiran 10. Hasil Pencetakan <i>Flexible Strain Sensor</i> Faktor Optimasi	132
Lampiran 11. Respons Hasil Optimasi	133
Lampiran 12. Hasil Pengukuran Perubahan GF	135