

## DAFTAR ISI

LEMBAR IDENTITAS .....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	iii
PRAKATA .....	iv
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
DAFTAR NOTASI.....	xix
INTISARI.....	xxi
<i>ABSTRACT</i> .....	xxii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	7
1.3 Lingkup dan Batasan .....	9
1.4 Tujuan Penelitian.....	10
1.5 Manfaat Penelitian.....	11
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	12
2.1 Tinjauan Pustaka .....	12
2.1.1 Anatomi dan Histologi Pembuluh Otak .....	12
2.1.2 Aterosklerosis sebagai Penyebab Stroke.....	14
2.1.3 Mekanika Pembuluh Darah dan Aterosklerosis .....	19

2.1.4 Perkembangan <i>Stent</i> .....	20
2.1.5 Pencegahan Stroke dengan <i>Stent</i> .....	27
2.1.6 Pemasangan <i>Stent</i> .....	28
2.1.7 Manufaktur <i>Stent</i> .....	30
2.1.8 Karakteristik <i>Stent</i> .....	34
2.1.8.1 Aspek Material .....	35
2.1.8.2 Aspek Desain.....	36
2.1.8.3 Aspek Manufaktur .....	36
2.2 Kebaruan Penelitian.....	37
2.3 Landasan Teori.....	39
2.3.1 <i>Finite Element Analysis</i> (FEA).....	39
2.3.2 Fotopolimer .....	44
2.3.2.1 Fotoinisiator .....	44
2.3.2.2 Viskositas Resin .....	45
2.3.2.3 Mekanisme Fotopolimerisasi .....	45
2.3.2.4 <i>Shrinkage</i> .....	47
2.3.2.5 <i>Cure Depth</i> .....	48
2.3.3 Kitosan.....	49
2.3.4 <i>Poly(ethylene glycol) Diacrylate</i> (PEGDA).....	50
2.3.5 <i>Graphene</i> .....	52
2.3.6 Desain Eksperimen .....	55
2.3.6.1 <i>One-Factor-At-a-Time</i> (OFAT) .....	56
2.3.6.2 <i>Factorial Design</i> (FD) .....	56
2.3.6.3 <i>Fractional Factorial Design</i> (FFD).....	57
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	60

3.1 Material .....	60
3.2 Alat .....	61
3.3 Tahapan Penelitian .....	62
3.3.1 Simulasi <i>Stent Inastent</i> .....	62
3.3.1.1 Model material .....	62
3.3.1.2 Model <i>Stent</i> .....	63
3.3.1.3 Uji Ekspansi <i>Stent</i> .....	63
3.3.2 Sintesis <i>Graphene</i> .....	64
3.3.2.1 Iradiasi Grafit .....	65
3.3.2.2 Eksfoliasi Grafit .....	65
3.3.2.3 Karakterisasi <i>Graphene</i> .....	66
3.3.3 Nanokomposit <i>Graphene</i> .....	66
3.3.3.1 Preparasi Film Nanokomposit .....	66
3.3.3.2 Preparasi Larutan <i>Simulated Body Fluid</i> (SBF)-Tris .....	67
3.3.3.3 Karakterisasi Nanokomposit Kitosan-Gliserol- <i>Graphene</i> .....	68
3.3.3.4 Simulasi Stent Nanokomposit .....	69
3.3.4 Fotopolimer <i>Graphene</i> .....	70
3.3.4.1 Spektroskopi Fotoinisiator .....	70
3.3.4.2 Faktor dan Level Eksperimen .....	71
3.3.4.3 Desain Eksperimen Fotopolimer .....	72
3.3.4.4 Preparasi Fotopolimer .....	72
3.3.4.5 Uji Densitas .....	73
3.3.4.6 Uji Viskositas .....	73
3.3.4.7 Uji <i>Shrinkage</i> .....	74
3.3.4.8 Uji <i>Cure Depth</i> (Cd) .....	75

3.3.4.9 Uji Tarik .....	76
3.3.4.10 Uji FTIR .....	77
3.3.5 <i>Prototipe Stent</i> .....	77
3.3.5.1 Uji <i>Printing</i> .....	78
3.3.5.2 Evaluasi Uji <i>Printing</i> .....	79
3.3.5.3 Model 3D CAD Prototipe <i>Stent</i> .....	80
3.3.5.4 Strategi <i>Printing</i> Prototipe .....	80
3.3.5.5 Faktor dan Level <i>Printing</i> Prototipe .....	81
3.3.5.6 Desain Eksperimen Prototipe .....	82
3.4 Diagram Alir Tahapan Penelitian .....	83
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	85
4.1 Simulasi <i>Stent Inastent</i> .....	85
4.1.1 Ekspansi <i>Inastent</i> .....	85
4.1.2 <i>Recoil Inastent</i> .....	88
4.1.3 <i>Foreshortening Inastent</i> .....	90
4.2 Sintesis <i>Graphene</i> .....	90
4.2.1 Spektrum XRD Iradiasi Grafit .....	90
4.2.2 Eksfoliasi Grafit .....	91
4.2.3 Observasi TEM .....	92
4.2.4 Spektroskopi FTIR .....	93
4.2.5 Analisis PSA .....	94
4.3 Nanokomposit <i>Graphene</i> .....	95
4.3.1 Spektroskopi FTIR .....	95
4.3.2 Sifat Mekanikal .....	97
4.3.3 Observasi SEM .....	99

4.3.4 <i>Swelling</i> dan Degradasi .....	100
4.3.5 Simulasi Stent Nanokomposit.....	102
4.3.5.1 Ekspansi .....	102
4.3.5.2 <i>Recoil</i> .....	104
4.3.5.3 <i>Foreshortening</i> .....	104
4.4 Fotopolimer <i>Graphene</i> .....	105
4.4.1 Spektrum UV fotoinisiator .....	105
4.4.2 Fotopolimer .....	106
4.4.3 Densitas .....	107
4.4.4 Viskositas .....	107
4.4.5 <i>Shrinkage</i> .....	110
4.4.6 <i>Cure Depth</i> .....	112
4.4.7 Uji Tarik .....	114
4.4.7.1 Modulus .....	115
4.4.7.2 <i>Tensile</i> .....	117
4.4.7.3 Konsekuensi Sifat Mekanikal Fotopolimer <i>Graphene</i> .....	119
4.4.8 Spektroskopi FTIR.....	120
4.5 Prototipe <i>Stent</i> .....	121
4.5.1 Uji <i>Printing</i> .....	121
4.5.2 <i>Defect</i> pada Obyek <i>Printing</i> .....	122
4.5.3 Evaluasi Viskositas Resin.....	124
4.5.4 Evaluasi Parameter <i>Printing</i> .....	124
4.5.5 Evaluasi Dimensi Uji <i>Printing</i> .....	125
4.5.6 Prototipe <i>Stent</i> .....	125
4.5.7 Dimensi Panjang Aktual dan Galat.....	126

4.5.8 Dimensi Diameter Aktual dan Galat .....	130
4.5.9 Konsekuensi Desain <i>Stent</i> .....	134
BAB 5 PENUTUP .....	137
5.1 Kesimpulan .....	137
5.2 Saran .....	139
DAFTAR PUSTAKA .....	140
DAFTAR LAMPIRAN .....	159
Lampiran 1. Daftar Publikasi .....	159
1.1 Prosiding Internasional (Wajdi et al., 2018) .....	159
1.2 Jurnal Internasional (Wajdi et al., 2021) .....	161
1.3 Jurnal Internasional (Wajdi et al., 2021) .....	163
1.4 Paten (telah didaftarkan) .....	165
Lampiran 2. Standar Pengujian .....	169
2.1 Uji Tarik ASTM D638 .....	169
2.2 Uji Tarik ASTM D882 .....	178
Lampiran 3. Biokompatibilitas Material .....	186
3.1 Referensi Biokompatibilitas Material Fotopolimer .....	186
3.2 <i>Material Safety Data Sheet</i> (MSDS) PEGDA .....	187
3.3 <i>Material Safety Data Sheet</i> (MSDS) TPO .....	195
3.4 <i>Material Safety Data Sheet</i> (MSDS) <i>Graphene</i> .....	204
Lampiran 4. Hasil Uji PSA <i>Graphene</i> .....	212
4.1 Hasil Uji PSA .....	212
4.2 Regresi PSA <i>Graphene</i> .....	215
Lampiran 5. Hasil Uji Tarik Nanokomposit .....	216
5.1 Uji Anova dan Tukey's Post Hoc <i>Tensile</i> ( $\alpha=0,05$ ) .....	216

5.2 Uji Anova dan Tukey's Post Hoc <i>Young's Modulus</i> ( $\alpha=0,05$ ).....	217
5.3 Uji Anova dan Tukey's Post Hoc <i>Elongation at Break</i> ( $\alpha=0,05$ ).....	218
5.4 Uji Anova dan Tukey's Post Hoc <i>Yield Strength</i> ( $\alpha=0,05$ ).....	219
5.5 Optimasi <i>Multiobjective Criteria</i> Hasil Uji Tarik .....	220
Lampiran 6. Hasil Uji Viskositas dan <i>Shrinkage</i> .....	224
6.1 Desain Eksperimen FD 2 <sup>2</sup> .....	224
6.2 Densitas ( $\rho$ ).....	226
6.3 Respon Viskositas ( $\eta$ ) .....	227
6.4 Respon <i>Shrinkage</i> .....	231
Lampiran 7. Hasil Uji <i>Cure Depth</i> .....	235
7.1 Data Hasil Uji <i>Cure Depth</i> .....	235
7.2 Uji Anova dan Tukey's Post-Hoc <i>Cure Depth</i> .....	236
Lampiran 8. Hasil Uji Tarik Fotopolimer.....	242
8.1 Desain Eksperimen FFD <sup>3-1</sup> .....	242
8.2 Respon <i>Young's Modulus</i> .....	244
8.3 Respon <i>Tensile Strength</i> .....	248
Lampiran 9. Hasil <i>Printing</i> Prototipe.....	252
9.1 Desain Eksperimen Prototipe FD 2 <sup>2</sup> .....	252
9.2 Respon Panjang Aktual .....	254
9.3 Respon Galat Panjang .....	258
9.4 Respon Diameter Aktual .....	262
9.5 Respon Galat Diameter .....	266

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Jenis stroke (Heartandstroke.ca, 2017) .....	2
Gambar 1.2. Pemasangan <i>stent</i> (Encyclopædia Britannica, 2017).....	2
Gambar 1.3. Karakteristik ideal <i>stent</i> BRS (Debusschere, 2016) .....	4
Gambar 1.4. <i>Stent</i> (a) hasil 3D <i>printing</i> dan (b) model CAD (Misra <i>et al.</i> , 2017)..	6
Gambar 1.5. <i>Stent</i> PLA (a) hasil 3D <i>printing</i> dan (b) struktur <i>layernya</i> (Jia <i>et al.</i> , 2018) .....	6
Gambar 2.1. Anatomi pembuluh darah menuju otak (Mayoclinic.org, 2017) .....	13
Gambar 2.2. Histologi pembuluh darah (Fortier <i>et al.</i> , 2014).....	14
Gambar 2.3. Klasifikasi plak aterosklerosis (Bentzon <i>et al.</i> , 2014) .....	16
Gambar 2.4. Prosedur penanganan aterosklerosis intrakranial (Qureshi and Caplan, 2013) .....	18
Gambar 2.5. Batas fraktur pembuluh dan plak.....	20
Gambar 2.6. Perbandingan ketebalan <i>strut stent</i> (Indolfi <i>et al.</i> , 2016).....	26
Gambar 2.7. Neointima pada <i>BX Velocity</i> dan <i>Driver</i> (Foin <i>et al.</i> , 2014).....	26
Gambar 2.8. <i>Stent</i> intrakranial (a) <i>Wingspan</i> dan (b) <i>Vitesse</i> .....	27
Gambar 2.9. (a) <i>stent</i> polimer dan (b, c) kerusakan polimer pada sisi potongan <i>laser cutting</i> (Stepak <i>et al.</i> , 2014).....	31
Gambar 2.10. Karakteristik <i>stent</i> .....	35
Gambar 2.11. Kebaruan penelitian .....	39
Gambar 2.12. Penguraian regangan total menjadi komponen elastis dan plastik .	41
Gambar 2.13. Tahapan fotopolimerisasi .....	46
Gambar 2.14. Mekanisme <i>curing</i> (Bártolo, 2011).....	46
Gambar 2.15. Teknik SLA dan DLP (Schmidleithner and Kalaskar, 2018).....	47
Gambar 2.16 Konversi monomer pada fotopolimerisasi (Prabhakaran and Lee, 2019).....	48
Gambar 2.17. Struktur kimia kitosan (Croisier and Jérôme, 2013).....	49
Gambar 2.18. Struktur kimia PEGDA (Drira, 2009).....	50
Gambar 2.19. Fotopolimerisasi PEGDA (Mazzoccoli, 2008) .....	51
Gambar 2.20. Struktur <i>graphene</i> (Geim dan Novoselov, 2007) .....	53



Gambar 2.21. Sintesis <i>graphene</i> dari graphite (Rouf dan Kokini, 2016) .....	53
Gambar 2.22. Proses <i>liquid exfoliation</i> (Papageorgiou <i>et al.</i> , 2015).....	54
Gambar 2.23. Model suatu proses (Montgomery, 2012) .....	56
Gambar 3.1. Geometri Inastent .....	63
Gambar 3.2. Skema proses eksfoliasi .....	65
Gambar 3.3. Struktur kimia fotoinisiator .....	71
Gambar 3.4. Viskometer Ostwald .....	74
Gambar 3.5. Skema uji <i>curing depth</i> .....	75
Gambar 3.6. Posisi <i>slicing</i> (a) dan ukuran spesimen ASTM D 638 tipe-V (b).....	77
Gambar 3.7. <i>Printer</i> 3D DLP Anycubic Zero (Shenzen Anycubic Technology, 2020) .....	78
Gambar 3.8. Obyek 3D tes <i>printing</i> .....	79
Gambar 3.9. Model 3D CAD Inastent .....	80
Gambar 3.10. <i>Support</i> pada model <i>stent</i> .....	81
Gambar 3.11. Diagram alir penelitian.....	83
Gambar 4.1. Tegangan Von Mises maksimum .....	86
Gambar 4.2. Tegangan Von Mises maksimum 0,2 MPa pada model PLLA.....	86
Gambar 4.3. Tegangan Von Mises maksimum 0,32 MPa pada model PLLA-GO87	
Gambar 4.4. Perubahan diameter dan panjang <i>stent</i> .....	88
Gambar 4.5. <i>Recoil</i> dan <i>foreshortening stent</i> .....	89
Gambar 4.6. Spektrum XRD grafit.....	90
Gambar 4.7. Suspensi <i>graphene</i> (A), platelet <i>graphene</i> setelah sentrifugasi (B), dan <i>graphene</i> setelah pengeringan (C) .....	92
Gambar 4.8. Hasil observasi TEM pada <i>graphene</i> .....	92
Gambar 4.9. Spektrum FTIR grafit dan <i>graphene</i> .....	93
Gambar 4.10. Frekuensi ukuran lateral <i>graphene</i> .....	94
Gambar 4.11. Frekuensi distribusi ukuran lateral <i>graphene</i> .....	95
Gambar 4.12. Spektrum FTIR nanokomposit .....	96
Gambar 4.13. Grafik properti mekanikal nanokomposit <i>graphene</i> -kitosan .....	99
Gambar 4.14. SEM patahan uji tarik CsGlyG 0.6 .....	100
Gambar 4.15. Perubahan rasio <i>swelling</i> .....	101

Gambar 4.16. Perubahan rasio degradasi.....	102
Gambar 4.17. Tegangan <i>von Mises stent</i> nanokomposit.....	103
Gambar 4.18. <i>Recoil stent</i> nanokomposit .....	104
Gambar 4.19. <i>Foreshortening stent</i> nanokomposit .....	105
Gambar 4.20. Spektra UV-Vis fotoinisiator.....	105
Gambar 4.21. Sampel resin fotopolimer PEGDA- <i>graphene</i> -TPO .....	106
Gambar 4.22. Densitas sampel fotopolimer .....	107
Gambar 4.23. Plot interaksi untuk respon viskositas.....	109
Gambar 4.24. Pengukuran sampel dengan jangka sorong .....	110
Gambar 4.25. <i>Shrinkage</i> fotopolimer .....	111
Gambar 4.26. Plot interaksi <i>graphene</i> dan TPO terhadap respon galat <i>shrinkage</i> . .....	112
Gambar 4.27. <i>Cure depth</i> resin dan waktu iradiasi .....	113
Gambar 4.28. Kurva tren pengukuran Cd .....	114
Gambar 4.29. Spesimen uji tarik .....	115
Gambar 4.30. Plot <i>main effect</i> untuk modulus .....	116
Gambar 4.31. Plot <i>main effect</i> untuk respon <i>tensile</i> .....	118
Gambar 4.32. Kurva tegangan-regangan nominal fotopolimer <i>graphene</i> .....	119
Gambar 4.33. IR spektra resin setelah <i>curing</i> .....	121
Gambar 4.34. Hasil <i>printing</i> obyek 3D.....	122
Gambar 4.35. <i>Defect</i> pada obyek uji <i>printing</i> .....	123
Gambar 4.36. Hasil uji <i>printing</i> resin dengan 0,3% <i>graphene</i> .....	123
Gambar 4.37. Hasil <i>printing stent</i> (a) dan pembesaran visual (b).....	126
Gambar 4.38. Interaksi variabel bebas untuk respon panjang aktual .....	128
Gambar 4.39. Plot interaksi faktor untuk respon galat panjang .....	130
Gambar 4.40. Plot interaksi faktor untuk respon diameter aktual.....	132
Gambar 4.41. Plot interaksi variabel bebas untuk respon galat diameter.....	133
Gambar 4.42. Geometri <i>inastent</i> .....	134

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Variasi diameter pembuluh otak .....	13
Tabel 2.2. Perkembangan <i>stent</i> (Robicsek <i>et al.</i> , 2004; Iqbal <i>et al.</i> , 2013) .....	21
Tabel 2.3. Ketebalan <i>strut stent</i> BMS komersial.....	23
Tabel 2.4. Karakteristik biopolimer (Kwon <i>et al.</i> , 2012).....	24
Tabel 2.5. <i>Stent</i> BRS komersial (Iqbal <i>et al.</i> , 2013).....	25
Tabel 2.6. Metode fabrikasi <i>stent</i> (Moore <i>et al.</i> , 2016) .....	31
Tabel 2.7. Kelebihan dan kekurangan metode <i>laser-cutting</i> dan 3DP DLP .....	33
Tabel 2.8. <i>State of the art</i> penelitian pengembangan <i>stent</i> 3DP.....	38
Tabel 2.9. Desain eksperimen FD 2 <sup>2</sup> .....	57
Tabel 2.10. <i>Factorial design</i> penuh 2 <sup>3</sup> .....	58
Tabel 3.1. Properti mekanikal model material .....	62
Tabel 3.2. Komposisi film nanokomposit kitosan-gliserol- <i>graphene</i> .....	67
Tabel 3.3. Properti mekanikal nanokomposit.....	69
Tabel 3.4. Faktor dan level eksperimen fotopolimer .....	72
Tabel 3.5. Desain eksperimen fotopolimer FD 2 <sup>2</sup> .....	72
Tabel 3.6. Komposisi fotopolimer.....	73
Tabel 3.7. Faktor dan level pembuatan spesimen uji tarik.....	76
Tabel 3.8. Desain eksperimen fotopolimer FFD 2 <sup>3-1</sup> .....	77
Tabel 3.9. Parameter uji <i>printing</i> .....	79
Tabel 3.10. Faktor dan level parameter Printing .....	82
Tabel 3.11. Rancangan eksperimen prototipe .....	82
Tabel 4.1. Hasil simulasi FEA.....	85
Tabel 4.2. Perbandingan tegangan residual hasil simulasi dengan <i>stent</i> komersial .....	87
Tabel 4.3. Perbandingan <i>recoil</i> .....	89
Tabel 4.4. Data perenggangan <i>interlayer</i> grafit.....	91
Tabel 4.5. Nilai serapan spektrum FTIR.....	96
Tabel 4.6. Properti mekanikal nanokomposit <i>graphene</i> -kitosan.....	97
Tabel 4.7. Hasil simulasi <i>stent</i> nanokomposit.....	102

Tabel 4.8 Hasil pengukuran viskositas resin .....	108
Tabel 4.9 Hasil uji Anova respon viskositas .....	108
Tabel 4.10. Hasil pengukuran <i>shrinkage</i> .....	110
Tabel 4.11. Hasil uji Anova untuk respon <i>shrinkage</i> .....	111
Tabel 4.12. Respon modulus .....	115
Tabel 4.13. Anova respon modulus .....	116
Tabel 4.14. Respon <i>tensile</i> .....	117
Tabel 4.15 Anova dari respon <i>tensile</i> .....	118
Tabel 4.16. Konversi data tegangan-regangan menjadi regangan plastis .....	120
Tabel 4.17. Hasil uji <i>printing</i> tiap sampel resin fotopolimer .....	121
Tabel 4.18. Hasil pengukuran pada obyek uji <i>printing</i> .....	125
Tabel 4.19. Dimensi panjang aktual prototipe .....	127
Tabel 4.20. Anova untuk respon dimensi panjang aktual .....	127
Tabel 4.21. Anova untuk respon galat panjang .....	129
Tabel 4.22. Dimensi diameter aktual prototipe .....	130
Tabel 4.23. Anova respon dimensi diameter prototipe .....	131
Tabel 4.24. Data Anova respon galat dimensi diameter .....	132

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Daftar Publikasi .....	159
Lampiran 2. Standar Pengujian .....	169
Lampiran 3. Biokompatibilitas Material .....	186
Lampiran 4. Hasil Uji PSA <i>Graphene</i> .....	212
Lampiran 5. Hasil Uji Tarik Nanokomposit.....	216
Lampiran 6. Hasil Uji Viskositas dan <i>Shrinkage</i> .....	224
Lampiran 7. Hasil Uji <i>Cure Depth</i> .....	235
Lampiran 8. Hasil Uji Tarik Fotopolimer .....	242
Lampiran 9. Hasil <i>Printing</i> Prototipe .....	252