

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
PRAKATA.....	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Luaran Penelitian	4
1.6. Manfaat Penelitian	4
1.7. Lokasi dan Tinjauan Umum	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	9
2.1. Tinjauan Pustaka	9
2.2. Landasan Teori	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	57
3.1. Metode Penelitian.....	57
3.2. Tahapan Penelitian	65
BAB IV PENGOLAHAN DAN PENYAJIAN DATA	68
4.1. Pengolahan Data.....	68

4.2. Penyajian Data	116
BAB V PEMBAHASAN	131
5.1. Pembahasan Hasil Analisis Signifikansi Perbedaan <i>Rate of Bolt Installation</i>	131
5.2. Pembahasan Hasil Pembangunan dan Validasi Model Prediksi <i>Rate of Bolt Installation</i>	135
5.3. Pembahasan Hasil Identifikasi Aktivitas untuk Upaya Perbaikan Operasional	137
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	139
6.1. Kesimpulan	139
6.2. Saran.....	140
DAFTAR PUSTAKA.....	141
LAMPIRAN.....	144

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Peta Geologi Regional Distrik Pertambangan Ertsberg (Ruswanto dkk., 2017)	5
Gambar 1.2. Area Operasional Pertambangan PTFI (Hutahaeen, 2024).....	7
Gambar 1.3. Kegiatan Penambangan dan Pengolahan di PTFI (PTFI, 2026).....	8
Gambar 2.1. Struktur Tambang Bawah Tanah (Hustrulid & Richard, 2001)	14
Gambar 2.2. Ilustrasi Metode <i>Block Caving</i> (Hustrulid & Richard, 2001)	16
Gambar 2.3. Siklus <i>Tunneling</i> (Tatiya, 2005).....	16
Gambar 2.4. Ilustrasi Penggunaan <i>Rock Bolt</i> (Hoek dkk., 2000).....	18
Gambar 2.5. <i>MDX Bolt</i> (Sandvik, 2021)	19
Gambar 2.6. <i>Resin Bolt</i> (Hoek dkk., 2000)	19
Gambar 2.7. Katrid Resin dan Katalis	20
Gambar 2.8. <i>Cable Bolt</i> (Hoek dkk., 2000).....	20
Gambar 2.9. <i>Split Set</i> (Hoek dkk., 2000).....	21
Gambar 2.10. <i>Weld Mesh</i> (Ginting dkk., 2017).....	22
Gambar 2.11. <i>Wire Mesh</i> (Ginting dkk., 2017).....	22
Gambar 2.12. <i>Shotcrete</i> di Terowongan (Ginting dkk., 2017).....	23
Gambar 2.13. <i>Concrete</i> (Ginting dkk., 2017).....	23
Gambar 2.14. Bagian <i>Jumbo Drill</i> (Sandvik, 2006).....	24
Gambar 2.15. Kemiringan Maksimal <i>Jumbo Drill</i> (PTFI, 2023).....	24
Gambar 2.16. <i>Anchor Jumbo Box</i>	25
Gambar 2.17. <i>Offsider</i> Memasang Selang Pada <i>Header</i>	25
Gambar 2.18. Contoh Hasil <i>Rock Bolting</i>	26
Gambar 2.19. Faktor Pengaruh di Lapangan (Heydari dkk., 2024)	28
Gambar 2.20. Kategori Kapasitas <i>Rate of Bolt Installation</i>	32
Gambar 3.1. Tahapan Penelitian	67
Gambar 4.1. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data <i>Training Model 1</i>	101
Gambar 4.2. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data <i>Testing Model 1</i>	101

Gambar 4.3. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Training Model 2	103
Gambar 4.4. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Testing Model 2	104
Gambar 4.5. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Training Model 3	106
Gambar 4.6. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Testing Model 3	106
Gambar 4.7. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Training Model 4	109
Gambar 4.8. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Testing Model 4	109
Gambar 4.9. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Training Model 5	111
Gambar 4.10. <i>Scatter Plot Rate of Bolt Installation</i> Terukur dan Prediksi Data Testing Model 5	112
Gambar 4.11. Penyajian Hasil Perhitungan Proporsi Aktivitas Axera 7	129
Gambar 4.12. Penyajian Hasil Perhitungan Proporsi Aktivitas DD422I	129

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Metode Penambangan Bawah Tanah (Tatiya, 2005)	15
Tabel 2.2. Kelas Mutu Massa Batuan (Bieniawski, 1989)	31
Tabel 2.3. Interpretasi Cohen's d (Lewis & Sauro, 2026).....	45
Tabel 2.4. Pedoman Interpretasi Koefisien Determinasi (R^2)	51
Tabel 2.5. Pedoman Interpretasi Korelasi Pearson	52
Tabel 3.1. Data Primer dan Sekunder	61
Tabel 3.2. Periode Pengambilan dan Jumlah Data	66
Tabel 4.1. Jumlah Data Bersih.....	69
Tabel 4.2. Contoh Hasil <i>Net Cycle Time</i>	70
Tabel 4.3. Rata-Rata <i>Net Cycle Time</i>	70
Tabel 4.4. Contoh Hasil Perhitungan <i>Rate of Bolt Installation</i>	70
Tabel 4.5. <i>Rate of Bolt Installation</i> Rata-Rata, Tertinggi, dan Terendah Data Gabungan	70
Tabel 4.6. <i>Rate of Bolt Installation</i> Rata-Rata, Tertinggi, dan Terendah, Dengan Pengelompokan Kondisi Massa Batuan dan Jenis <i>Rock Bolt</i>	71
Tabel 4.7. Hasil Uji Normalitas	72
Tabel 4.8. Nilai Kritis D Tabel.....	72
Tabel 4.9. Hasil Uji Homogenitas	73
Tabel 4.10. Nilai Kritis F Tabel	73
Tabel 4.11. Hasil Uji Mann-Whitney U.....	75
Tabel 4.12. Nilai Kritis Z Tabel	75
Tabel 4.13. <i>Effect Size</i> Rosenthal's R.....	75
Tabel 4.14. Hasil Uji Normalitas <i>Poor - Split Set</i>	77
Tabel 4.15. Hasil Uji Normalitas <i>Poor - MDX Bolt</i>	77
Tabel 4.16. Hasil Uji Normalitas <i>Fair - Split Set</i>	77
Tabel 4.17. Hasil Uji Normalitas <i>Fair - MDX Bolt</i>	77
Tabel 4.18. Hasil Uji Normalitas <i>Fair - Resin Bolt</i>	77
Tabel 4.19. Hasil Uji Normalitas <i>Good - Split Set</i>	78
Tabel 4.20. Hasil Uji Normalitas <i>Good - Resin Bolt</i>	78

Tabel 4.21. Nilai Kritis W Tabel <i>Poor – Split Set</i>	78
Tabel 4.22. Nilai Kritis W Tabel <i>Poor - MDX Bolt</i>	78
Tabel 4.23. Nilai Kritis W Tabel <i>Fair - Split Set</i>	78
Tabel 4.24. Nilai Kritis W Tabel <i>Fair - MDX Bolt</i>	79
Tabel 4.25. Nilai Kritis W Tabel <i>Fair - Resin Bolt</i>	79
Tabel 4.26. Nilai Kritis W Tabel <i>Good - Split Set</i>	79
Tabel 4.27. Nilai Kritis W Tabel <i>Good - Resin Bolt</i>	79
Tabel 4.28. Hasil Uji Homogenitas <i>Poor – Split Set</i>	80
Tabel 4.29. Hasil Uji Homogenitas <i>Poor – MDX Bolt</i>	80
Tabel 4.30. Hasil Uji Homogenitas <i>Fair – Split Set</i>	80
Tabel 4.31. Hasil Uji Homogenitas <i>Fair – MDX Bolt</i>	81
Tabel 4.32. Hasil Uji Homogenitas <i>Fair – Resin Bolt</i>	81
Tabel 4.33. Hasil Uji Homogenitas <i>Good – Split Set</i>	81
Tabel 4.34. Hasil Uji Homogenitas <i>Good – Resin Bolt</i>	81
Tabel 4.35. Nilai Kritis F Tabel <i>Poor – Split Set</i>	82
Tabel 4.36. Nilai Kritis F Tabel <i>Poor – MDX Bolt</i>	82
Tabel 4.37. Nilai Kritis F Tabel <i>Fair – Split Set</i>	82
Tabel 4.38. Nilai Kritis F Tabel <i>Fair – MDX Bolt</i>	82
Tabel 4.39. Nilai Kritis F Tabel <i>Fair – Resin Bolt</i>	82
Tabel 4.40. Nilai Kritis F Tabel <i>Good – Split Set</i>	82
Tabel 4.41. Nilai Kritis F Tabel <i>Good – Resin Bolt</i>	82
Tabel 4.42. Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Poor-Split Set</i>	84
Tabel 4.43. Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Poor-MDX Bolt</i>	84
Tabel 4.44. Hasil Uji T Welch <i>Fair-Split Set</i>	85
Tabel 4.45. Hasil Uji T Welch <i>Fair-MDX Bolt</i>	85
Tabel 4.46. Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Fair-Resin Bolt</i>	85
Tabel 4.47. Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Good-Split Set</i>	86
Tabel 4.48. Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Good-Resin Bolt</i>	86
Tabel 4.49. Nilai Kritis T Tabel <i>Poor – Split Set</i>	86
Tabel 4.50. Nilai Kritis T Tabel <i>Poor – MDX Bolt</i>	86
Tabel 4.51. Nilai Kritis T Tabel <i>Fair – Split Set</i>	86
Tabel 4.52. Nilai Kritis T Tabel <i>Fair – MDX Bolt</i>	87

Tabel 4.53. Nilai Kritis T Tabel <i>Fair</i> – <i>Resin Bolt</i>	87
Tabel 4.54. Nilai Kritis T Tabel <i>Good</i> – <i>Split Set</i>	87
Tabel 4.55. Nilai Kritis T Tabel <i>Good</i> – <i>Resin Bolt</i>	87
Tabel 4.56. <i>Effect Size</i> Cohen’s D <i>Poor</i> – <i>Split Set</i>	87
Tabel 4.57. <i>Effect Size</i> Cohen’s D <i>Poor</i> – <i>MDX Bolt</i>	88
Tabel 4.58. <i>Effect Size</i> Cohen’s D <i>Fair</i> – <i>Split Set</i>	88
Tabel 4.59. <i>Effect Size</i> Cohen’s D <i>Fair</i> – <i>MDX Bolt</i>	88
Tabel 4.60. <i>Effect Size</i> Cohen’s D <i>Fair</i> – <i>Resin Bolt</i>	89
Tabel 4.61. <i>Effect Size</i> Cohen’s D <i>Good</i> – <i>Split Set</i>	89
Tabel 4.62. <i>Effect Size</i> Cohen’s D <i>Good</i> – <i>Resin Bolt</i>	89
Tabel 4.63. Jumlah Data Bersih Berdasarkan RMR.....	90
Tabel 4.64. Contoh Data <i>Rate of Bolt Installation</i> , Pf, Pr, Pp, Db, dan RMR.....	91
Tabel 4.65. Data Rata-Rata, Tertinggi, dan Terendah Gabungan	91
Tabel 4.66. Model dan Estimasi Parameter Pf - <i>Rate of Bolt Installation</i>	92
Tabel 4.67. Model dan Estimasi Parameter Pr - <i>Rate of Bolt Installation</i>	93
Tabel 4.68. Model dan Estimasi Parameter Pp - <i>Rate of Bolt Installation</i>	94
Tabel 4.69. Model dan Estimasi Parameter Db - <i>Rate of Bolt Installation</i>	95
Tabel 4.70. Model dan Estimasi Parameter RMR - <i>Rate of Bolt Installation</i>	96
Tabel 4.71. Hasil Analisis Korelasi Pearson.....	97
Tabel 4.72. Nilai Rata-Rata, Tertinggi, dan Terendah Data <i>Training</i> dan <i>Testing</i> 98	
Tabel 4.73. Estimasi Parameter NLMR Model 1	99
Tabel 4.74. ANOVA NLMR Model 1	100
Tabel 4.75. Estimasi Parameter NLMR Model 2	102
Tabel 4.76. ANOVA NLMR Model 2.....	102
Tabel 4.77. Estimasi Parameter NLMR Model 3	105
Tabel 4.78. ANOVA NLMR Model 3	105
Tabel 4.79. Estimasi Parameter NLMR Model 4	107
Tabel 4.80. ANOVA NLMR Model 4.....	108
Tabel 4.81. Estimasi Parameter NLMR Model 5	110
Tabel 4.82. ANOVA NLMR Model 5.....	110
Tabel 4.83. Klasifikasi dan Kode Aktivitas	113
Tabel 4.84. Nilai Rata-Rata, Tertinggi, dan Terendah Aktivitas Axera 7	114

Tabel 4.85. Nilai Rata-Rata, Tertinggi, dan Terendah Aktivitas DD422I.....	114
Tabel 4.86. Durasi dan Proporsi Aktivitas Axera 7	115
Tabel 4.87. Durasi dan Proporsi Aktivitas DD422I.....	115
Tabel 4.88. Penyajian Hasil Uji Normalitas	117
Tabel 4.89. Penyajian Hasil Uji Homogenitas.....	117
Tabel 4.90. Penyajian Hasil Uji Mann-Whitney U.....	118
Tabel 4.91. Penyajian Hasil Uji Normalitas <i>Poor – Split Set</i>	119
Tabel 4.92. Penyajian Hasil Uji Normalitas <i>Poor – MDX Bolt</i>	119
Tabel 4.93. Penyajian Hasil Uji Normalitas <i>Fair – Split Set</i>	119
Tabel 4.94. Penyajian Hasil Uji Normalitas <i>Fair – MDX Bolt</i>	120
Tabel 4.95. Penyajian Hasil Uji Normalitas <i>Fair – Resin Bolt</i>	120
Tabel 4.96. Penyajian Hasil Uji Normalitas <i>Good – Split Set</i>	120
Tabel 4.97. Penyajian Hasil Uji Normalitas <i>Good – Resin Bolt</i>	121
Tabel 4.98. Penyajian Hasil Uji Homogenitas <i>Poor – Split Set</i>	121
Tabel 4.99. Penyajian Hasil Uji Homogenitas <i>Poor – MDX Bolt</i>	121
Tabel 4.100. Penyajian Hasil Uji Homogenitas <i>Fair – Split Set</i>	122
Tabel 4.101. Penyajian Hasil Uji Homogenitas <i>Fair – MDX Bolt</i>	122
Tabel 4.102. Penyajian Hasil Uji Homogenitas <i>Fair – Resin Bolt</i>	122
Tabel 4.103. Penyajian Hasil Uji Homogenitas <i>Good – Split Set</i>	122
Tabel 4.104. Penyajian Hasil Uji Homogenitas <i>Good – Resin Bolt</i>	123
Tabel 4.105. Penyajian Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Poor – Split Set</i> ..	123
Tabel 4.106. Penyajian Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Poor – MDX Bolt</i>	124
Tabel 4.107. Penyajian Hasil Uji T Welch <i>Fair – Split Set</i>	124
Tabel 4.108. Penyajian Hasil Uji T Welch <i>Fair – MDX Bolt</i>	124
Tabel 4.109. Penyajian Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Fair – Resin Bolt</i>	124
Tabel 4.110. Penyajian Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Good – Split Set</i> .	124
Tabel 4.111. Penyajian Hasil Uji T Dua Sampel Independen <i>Good – Resin</i>	124
Tabel 4.112. Penyajian Hasil <i>Effect Size</i> Cohen's D.....	125
Tabel 4.113. Penyajian Hasil Koefisien Determinasi Regresi Sederhana	126
Tabel 4.114. Penyajian Hasil Koefisien Korelasi Pearson.....	127
Tabel 4.115. Penyajian Hasil Persamaan Model NLMR Beserta Evaluasi Parameter dan Kinerja Model.....	128

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Peta Kesampaian Daerah.....	145
Lampiran B. Spesifikasi <i>Jumbo Drill</i> Tipe Axera 7 dan DD422I	146
Lampiran C. Hasil Uji Normalitas dan Homogenitas Tanpa Pengelompokan Kondisi Massa Batuan dan Jenis <i>Rock Bolt</i>	148
Lampiran D. Hasil Uji Signifikansi Perbedaan Tanpa Pengelompokan Kondisi Massa Batuan dan Jenis <i>Rock Bolt</i>	153
Lampiran E. Hasil Uji Normalitas dan Homogenitas Dengan Pengelompokan Kondisi Massa Batuan dan Jenis <i>Rock Bolt</i>	155
Lampiran F. Hasil Uji Signifikansi Perbedaan Dengan Pengelompokan Kondisi Massa Batuan dan Jenis <i>Rock Bolt</i>	161
Lampiran G. Hasil Analisis Regresi Sederhana	167
Lampiran H. Hasil Analisis Korelasi Pearson.....	170
Lampiran I. Hasil Pembangunan NLMR Model 1	171
Lampiran J. Hasil Pembangunan NLMR Model 2	174
Lampiran K. Hasil Pembangunan NLMR Model 3	177
Lampiran L. Hasil Pembangunan NLMR Model 4.....	180
Lampiran M. Hasil Pembangunan NLMR Model 5	183

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN		
CI	<i>Confidence Interval</i>	49
GBC	<i>Grassberg Block Caving</i>	1
GSI	<i>Geological Strength Index</i>	30
KL	Kucing Liar	1
MCM	<i>Material Construction Maintenance</i>	36
mdpl	Meter di Atas Permukaan Laut	4
MDX	<i>Mechanical Dynamic Extra</i>	3
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>	12
NLMR	<i>Nonlinear Multiple Regression</i>	11
PCR	<i>Principal Component Regression</i>	47
PLS	<i>Partial Least Squares</i>	47
PT	Perseroan Terbatas	1
PTFI	PT Freeport Indonesia	1
Q	<i>Quality</i>	30
RD _i	<i>Rock Mass Drillability Index</i>	10
RF	<i>Random Forest</i>	12
RM _i	<i>Rock Mass Index</i>	30
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>	30
ROI	<i>Rate of Bolt Installation</i>	101
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>	30
RSE	<i>Relative Standard Error</i>	49
SPSS	<i>Statistical Package for The Social Sciences</i>	40
SVR	<i>Support Vector Regression</i>	12
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strength</i>	31
WIUPK	Wilayah Izin Usaha Pertambangan Khusus	4
YIA	Yogyakarta International Airport	5
LAMBANG		
%	Persen	10
B _t	<i>Bor Time</i>	34
CaCl ₂	Kalsium Klorida	23
ci	Konstanta Pergeseran (<i>Offset</i>)	54
Db	Diameter <i>Bolt</i>	61
df	Derajat Kebebasan (Df)	39
D _{max}	Nilai Uji Statistik Kolmogorov-Smirnov	41
F ₀ (x)	Fungsi Distribusi Kumulatif Teoritis	41
H ₀	Hipotesis 0	40

H1	Hipotesis 1	41
It	<i>Install Time</i>	35
k	Jumlah Kelompok yang Diuji	42
km	Kilometer	4
L	Panjang <i>Bolt</i>	35
M1	Rata-Rata Kelompok 1	39
m ²	Meter Persegi	27
M2	Rata-Rata Kelompok 2	39
mm	Milimeter	4
N1	Jumlah Subjek/Sampel Kelompok 1	39
N2	Jumlah Subjek/Sampel Kelompok 2	39
NCT	<i>Net Cycle Time</i>	34
ni	Jumlah Data Pada Kelompok Ke-I	42
p	Probabilitas	40
PBt	<i>Positioning Bor Time</i>	34
Pf	<i>Feed Pressure</i>	10
Pp	<i>Hammer Pressure</i>	11
PIt	<i>Positioning Install Time</i>	35
Pr	<i>Rotation Pressure</i>	11
r	Koefisien Korelasi	52
R ²	Koefisien Determinasi	11
RBt	<i>Repositioning Bor Time</i>	34
Rd	Radius Belokan Dalam	27
RIIt	<i>Repositioning Install Time</i>	35
RI	Radius Belokan Luar	27
Sig	Signifikansi	42
Sn(x)	Fungsi Distribusi Kumulatif Empiris dari Data Sampel	41
SS1	<i>Sum of Square</i> Kelompok 1	39
SS2	<i>Sum of Square</i> Kelompok 2	39
t	<i>t-test</i>	40
U1	Jumlah Peringkat 1	44
U2	Jumlah Peringkat 2	44
W	Nilai Uji Statistik Shapiro-Wilk	41
X	Variabel Independen (Bebas)	49
Y	Variabel Dependen (Terikat)	49
Z..	Rata-Rata Keseluruhan Nilai Zij	42
Zi.	Rata-Rata Nilai Zij Pada Kelompok Ke-i	42
Zij	Nilai Absolut Deviasi Data ke-j Pada Kelompok ke-i	42
α	Nilai Signifikansi	39
β_0	Koefisien Intersep Regresi	49