

|                                                                                |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| HALAMAN JUDUL .....                                                            | ii    |
| HALAMAN PERSETUJUAN .....                                                      | iii   |
| HALAMAN PENGESAHAN .....                                                       | iv    |
| HALAMAN PERNYATAAN .....                                                       | v     |
| HALAMAN PERSEMBAHAN .....                                                      | vi    |
| KATA PENGANTAR .....                                                           | vii   |
| DAFTAR ISI .....                                                               | viii  |
| DAFTAR TABEL .....                                                             | xiv   |
| DAFTAR GAMBAR .....                                                            | xvi   |
| DAFTAR LAMBANG .....                                                           | xix   |
| DAFTAR ISTILAH (OPSIONAL) .....                                                | xx    |
| INTISARI .....                                                                 | xxii  |
| ABSTRACT .....                                                                 | xxiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....                                                        | 1     |
| 1.1 Latar Belakang .....                                                       | 1     |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                                                      | 3     |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                                                    | 3     |
| 1.4 Batasan Masalah .....                                                      | 4     |
| 1.5 Manfaat Penelitian .....                                                   | 5     |
| 1.6 Struktur Tesis .....                                                       | 5     |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....                                                   | 7     |
| 2.1 <i>Waste Material</i> pada Proyek Konstruksi .....                         | 7     |
| 2.2 Strategi Minimisasi <i>Waste</i> melalui <i>Special length Rebar</i> ..... | 8     |
| 2.2.1 Keuntungan Implementasi .....                                            | 8     |
| 2.2.2 Tantangan Implementasi .....                                             | 8     |
| 2.3 Building Information Modeling (BIM) untuk Manajemen Proyek .....           | 9     |
| 2.4 <i>Visual Programming</i> dalam BIM .....                                  | 10    |
| 2.5 Genetic Algorithm (GA) dalam Optimasi Material .....                       | 11    |
| 2.6 Integrasi BIM dan GA dalam Optimasi Tulangan .....                         | 13    |
| 2.7 Penghematan dan Efisiensi Berkelanjutan .....                              | 13    |
| 2.8 Kebaruan Penelitian .....                                                  | 14    |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 2.8.1 Penelitian Terdahulu .....                      | 14 |
| 2.8.2 Urgensi Penelitian .....                        | 15 |
| BAB 3 LANDASAN TEORI .....                            | 20 |
| 3.1 Definisi Jembatan .....                           | 20 |
| 3.1.1 Jembatan Slab Beton Bertulang .....             | 20 |
| 3.1.2 Komponen Utama Jembatan Beton Bertulang .....   | 20 |
| 3.2 Optimasi dalam Konstruksi .....                   | 22 |
| 3.3 Tulangan Baja Konstruksi .....                    | 23 |
| 3.3.1 <i>Special length Rebar</i> (SpL) .....         | 24 |
| 3.3.2 Rumus Dasar Material Baja Tulangan .....        | 24 |
| 3.3.3 Rumus <i>Waste Material</i> Baja Tulangan ..... | 25 |
| 3.3.4 Aturan Evaluasi Batang Tulangan .....           | 26 |
| 3.4 <i>Cutting Stock Problem</i> (CSP) .....          | 26 |
| 3.4.1 Definisi dan Karakteristik CSP .....            | 26 |
| 3.4.2 Aplikasi CSP pada Pemotongan Tulangan .....     | 27 |
| 3.4.3 Model Umum CSP dalam Konstruksi .....           | 27 |
| 3.4.4 Pendekatan Kombinatorika dalam CSP .....        | 28 |
| 3.5 Semesta Kemungkinan ( <i>Search Space</i> ) ..... | 29 |
| 3.6 Building Information Modeling (BIM) .....         | 32 |
| 3.6.1 Latar Belakang BIM .....                        | 32 |
| 3.6.2 Perkembangan BIM .....                          | 33 |
| 3.6.3 Penerapan BIM untuk Manajemen Tulangan .....    | 33 |
| 3.7 BIM <i>Execution Plan</i> (BEP) .....             | 34 |
| 3.8 Genetic Algorithm (GA) .....                      | 36 |
| 3.8.1 Sejarah Singkat dan Konsep Dasar .....          | 36 |
| 3.8.2 Prinsip Evolusi Biologi dalam GA .....          | 36 |
| 3.8.3 Skema Umum Proses GA .....                      | 37 |
| 3.9 Komponen Utama Genetic Algorithm (GA) .....       | 38 |
| 3.9.1 Encoding dan Decoding .....                     | 38 |
| 3.9.2 Representasi Kromosom .....                     | 40 |
| 3.9.3 Inisialisasi Populasi .....                     | 41 |
| 3.9.4 Fungsi <i>Fitness</i> .....                     | 42 |
| 3.9.5 Seleksi ( <i>Selection</i> ) .....              | 44 |
| 3.9.6 <i>Crossover</i> (Persilangan) .....            | 45 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.9.7 Mutasi ( <i>Mutation</i> ).....                                  | 46 |
| 3.9.8 Elitisme dan Terminasi .....                                     | 48 |
| 3.9.9 <i>Loop</i> (Iterasi/Generasi).....                              | 49 |
| 3.10 Integrasi GA dalam Lingkungan BIM-Dynamo .....                    | 50 |
| 3.10.1 Peran GA dalam BIM-Based Optimization .....                     | 51 |
| 3.10.2 <i>Visual Programming</i> dengan Dynamo.....                    | 51 |
| 3.10.3 Aliran Data antara Revit - Dynamo - Python.....                 | 51 |
| 3.10.4 Kelebihan Integrasi GA dan BIM untuk Proyek Infrastruktur.....  | 52 |
| 3.11 Formulasi Perhitungan Biaya dan Emisi.....                        | 52 |
| 3.11.1 <i>Markup</i> Harga <i>Special length</i> .....                 | 52 |
| 3.11.2 Harga Pembelian Batang.....                                     | 53 |
| 3.11.3 Emisi Karbon .....                                              | 53 |
| 3.12 Validasi MOQ dan Penyesuaian <i>Special length</i> Rebar.....     | 54 |
| 3.13 Output Optimasi .....                                             | 56 |
| 3.14 Alat Bantu dan Perangkat Lunak .....                              | 56 |
| 3.14.1 Autodesk Revit.....                                             | 56 |
| 3.14.2 Autodesk Navisworks Manage .....                                | 56 |
| 3.14.3 SOFiSTiK Reinforcement.....                                     | 57 |
| 3.14.4 Microsoft Excel.....                                            | 57 |
| 3.15 Integrasi Alat dan Proses Optimasi .....                          | 57 |
| BAB 4 METODE PENELITIAN.....                                           | 58 |
| 4.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian .....                              | 58 |
| 4.2 Objek dan Lokasi Penelitian .....                                  | 58 |
| 4.3 Data dan Alat Penelitian .....                                     | 59 |
| 4.3.1 Data Penelitian .....                                            | 59 |
| 4.3.2 Alat Penelitian.....                                             | 61 |
| 4.4 Prosedur Penelitian .....                                          | 62 |
| 4.5 Penyusunan <i>BIM Execution Plan</i> (BEP).....                    | 66 |
| 4.6 Pembuatan Model BIM.....                                           | 67 |
| 4.6.1 Permodelan Struktur Bawah ( <i>Substructure</i> ) .....          | 67 |
| 4.6.2 Permodelan Struktur Atas ( <i>Superstructure</i> ).....          | 68 |
| 4.6.3 Permodelan Tulangan Jembatan .....                               | 68 |
| 4.6.4 Pengecekan Konflik atau Benturan ( <i>clash detection</i> )..... | 68 |
| 4.7 Pembuatan <i>Script</i> Dynamo.....                                | 69 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8 Quantity Take-off dari BIM dan Dynamo .....                         | 69 |
| 4.9 Variabel, <i>Constraint</i> dan <i>Range</i> Genetic Algorithm..... | 72 |
| 4.9.1 Variabel <i>Input</i> dan <i>Range</i> .....                      | 72 |
| 4.9.2 Variabel Output dan <i>Range</i> .....                            | 74 |
| 4.9.3 <i>Constraint</i> .....                                           | 75 |
| 4.9.4 Ringkasan Variabel, <i>Range</i> , dan <i>Constraint</i> .....    | 76 |
| 4.10 Representasi Solusi dalam CSP dengan GA .....                      | 78 |
| 4.10.1 Bentuk Kromosom pada CSP.....                                    | 78 |
| 4.10.2 <i>Mapping</i> Data.....                                         | 79 |
| 4.10.3 <i>Encoding</i> dan <i>Decoding</i> .....                        | 80 |
| 4.10.4 Penanganan <i>Constraint</i> .....                               | 81 |
| 4.11 Parameter Genetic Algorithm .....                                  | 83 |
| 4.11.1 Input Data.....                                                  | 83 |
| 4.11.2 Parameter Umum .....                                             | 84 |
| 4.11.3 Inisiasi Populasi .....                                          | 85 |
| 4.11.4 Evaluasi Batang.....                                             | 85 |
| 4.11.5 Evaluasi <i>Fitness Function</i> .....                           | 86 |
| 4.12 Tahap Operator Genetic Algorithm .....                             | 86 |
| 4.12.1 Seleksi .....                                                    | 86 |
| 4.12.2 <i>Crossover</i> .....                                           | 86 |
| 4.12.3 Mutasi.....                                                      | 87 |
| 4.12.4 <i>Looping</i> .....                                             | 88 |
| 4.13 Post Processing dan Evaluasi .....                                 | 88 |
| 4.13.1 <i>Post Processing</i> .....                                     | 89 |
| 4.13.2 Evaluasi Konvergensi, Stabilitas, dan Efisiensi .....            | 89 |
| 4.14 Teknik Validasi dan Analisis Data.....                             | 90 |
| 4.14.1 Validasi .....                                                   | 90 |
| 4.14.2 Analisis Data .....                                              | 91 |
| BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN.....                                         | 92 |
| 5.1 Hasil Penyusunan <i>BIM Execution Plan</i> (BEP) .....              | 92 |
| 5.1.1 Pengusulan <i>BIM Execution Plan</i> (BEP).....                   | 92 |
| 5.1.2 Tujuan BEP .....                                                  | 93 |
| 5.1.3 Mengidentifikasi Tujuan dan Potensi Penggunaan BIM .....          | 94 |
| 5.1.4 Ruang Lingkup Penerapan BIM.....                                  | 94 |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.5 Tim/Personil BIM                                   | 94  |
| 5.1.6 <i>Level of Development</i> (LOD)                  | 95  |
| 5.1.7 <i>Software</i> dan <i>Platform</i>                | 95  |
| 5.1.8 Alur Integrasi BIM-GA                              | 95  |
| 5.1.9 Standar dan Prosedur                               | 96  |
| 5.1.10 <i>Deliverables</i>                               | 97  |
| 5.2 Pembuatan Model BIM Jembatan                         | 97  |
| 5.2.1 Permodelan Struktur Bawah ( <i>Substructure</i> )  | 97  |
| 5.2.2 Permodelan Struktur Atas ( <i>Superstructure</i> ) | 101 |
| 5.2.3 Permodelan Tulangan Jembatan                       | 102 |
| 5.2.4 Validasi Model BIM                                 | 106 |
| 5.3 <i>Quantity Take Off</i> (QTO) Tulangan              | 108 |
| 5.3.1 Pembuatan Script Dynamo untuk QTO                  | 108 |
| 5.3.2 QTO dengan Dynamo Player                           | 109 |
| 5.3.3 Hasil QTO Tulangan                                 | 110 |
| 5.3.4 Validasi Hasil QTO                                 | 112 |
| 5.3.5 Perhitungan Konvensional Pemesanan Tulangan        | 113 |
| 5.4 Pembuatan Script Python GA                           | 114 |
| 5.4.1 Mengimport Modul/ <i>Library</i>                   | 114 |
| 5.4.2 Input Parameter Umum                               | 114 |
| 5.4.3 Input dari Dynamo                                  | 115 |
| 5.4.4 Mapping                                            | 115 |
| 5.4.5 Inisiasi Populasi Awal                             | 115 |
| 5.4.6 Evaluasi <i>Fitness</i>                            | 115 |
| 5.4.7 Seleksi Orang Tua                                  | 116 |
| 5.4.8 <i>Crossover</i>                                   | 116 |
| 5.4.9 Mutasi                                             | 116 |
| 5.4.10 Elitisme                                          | 116 |
| 5.4.11 Penanganan Diversitas                             | 117 |
| 5.4.12 <i>Post-Processing</i> Hasil                      | 117 |
| 5.4.13 Rekapitulasi Akhir                                | 117 |
| 5.4.14 Pelacakan Evolusi                                 | 117 |
| 5.5 Implementasi GA di Dynamo                            | 118 |
| 5.5.1 Penjelasan Kunci Integrasi                         | 118 |

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5.2 Pembuatan Script GA di Dynamo .....                  | 119 |
| 5.5.3 GA dengan Dynamo Player .....                        | 120 |
| 5.6 Analisis Pengaruh Parameter GA .....                   | 121 |
| 5.6.1 Pengaruh Parameter GA Percobaan 1 .....              | 121 |
| 5.6.2 Pengaruh Parameter GA Percobaan 2 .....              | 125 |
| 5.6.3 Pengaruh Parameter GA Percobaan 3 .....              | 131 |
| 5.6.4 Kesimpulan Pengaruh Parameter GA .....               | 134 |
| 5.7 Analisis Pengaruh Skema Optimasi GA .....              | 136 |
| 5.7.1 Optimasi dengan Batang Standar .....                 | 136 |
| 5.7.2 Optimasi dengan SpL dan tanpa MOQ .....              | 139 |
| 5.7.3 Kesimpulan Pengaruh Skema Optimasi .....             | 142 |
| 5.8 Hasil Optimasi <i>Cutting Pattern</i> dengan MOQ ..... | 143 |
| 5.8.1 Pola Pemakaian Tulangan .....                        | 144 |
| 5.8.2 Rekapitulasi Batang .....                            | 145 |
| 5.8.3 <i>Waste</i> dan Efisiensi Material .....            | 146 |
| 5.8.4 Analisis Biaya .....                                 | 146 |
| 5.8.5 Emisi Karbon .....                                   | 146 |
| 5.9 Validasi MOQ <i>Special length</i> Rebar .....         | 147 |
| 5.10 Perbandingan Hasil Optimasi .....                     | 147 |
| 5.10.1 Perbandingan Seluruh Skenario dengan QTO .....      | 147 |
| 5.10.2 Perbandingan Persentase Terhadap Skenario .....     | 151 |
| 5.10.3 Persentase Pengurangan Relatif .....                | 152 |
| 5.11 Pembahasan .....                                      | 153 |
| BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN .....                           | 155 |
| 6.1 Kesimpulan .....                                       | 155 |
| 6.2 Saran .....                                            | 156 |
| DAFTAR PUSTAKA .....                                       | 158 |
| LAMPIRAN 1 .....                                           | 168 |
| LAMPIRAN 2 .....                                           | 182 |
| LAMPIRAN 3 .....                                           | 186 |