

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL .....   | i    |
| LEMBAR PENGESAHAN .....   | ii   |
| PERNYATAAN .....  | ii   |
| PRAKATA.....  | ivv  |
| ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....                                      | vii  |
| ABSTRACT.....   | viii |
| INTISARI .....  | ixx  |
| DAFTAR ISI.....   | x    |
| DAFTAR GAMBAR.....  | xii  |
| DAFTAR TABEL.....   | xiv  |
| BAB I PENDAHULUAN .....   | 1    |
| 1.1 Latar belakang.....   | 1    |
| 1.2 Perumusan Masalah .....   | 2    |
| 1.3 Keaslian penelitian.....  | 3    |
| 1.4 Tujuan penelitian .....   | 7    |
| 1.5 Manfaat penelitian .....  | 7    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI .....                      | 8    |
| 2.1 Tinjauan pustaka .....  | 8    |
| 2.2 Dasar Teori.....  | 12   |
| 2.2.1 Motor induksi .....   | 12   |
| 2.2.2 Klasifikasi motor induksi.....                                  | 14   |
| 2.2.3 Motor induksi untuk kendaraan listrik .....                     | 15   |
| 2.2.4 Material magnetik, elektrik dan isolasi dari motor induksi..... | 17   |
| 2.2.5 Desain motor induksi sangkar tupai .....                        | 18   |
| 2.2.6 Parameter motor induksi.....                                    | 25   |
| 2.2.7 Rugi-rugi motor induksi .....                                   | 29   |
| 2.2.8 Performa dan operasi .....                                      | 32   |
| 2.2.9 Konveksitivitas .....   | 35   |
| 2.2.10 Algoritma Genetika .....                                       | 36   |
| 2.3 Hipotesis .....   | 40   |

|  |    |
|--|----|
| BAB III METODOLOGI .....                                       | 42 |
| 3.1    Jalannya Penelitian.....                                | 42 |
| 3.2    Spesifikasi, standard dan material yang digunakan ..... | 43 |
| 3.3    Desain mesin.....                                       | 46 |
| 3.3.1    Penentuan besaran magnetis.....                       | 47 |
| 3.3.2    Desain dimensi utama.....                             | 48 |
| 3.3.3    Stator.....   | 48 |
| 3.3.4    Rotor .....   | 51 |
| 3.3.5    Parameter motor induksi.....                          | 52 |
| 3.3.6    Performa motor induksi.....                           | 53 |
| 3.4    Optimasi.....   | 55 |
| 3.4.1    Fungsi Objektif.....                                  | 56 |
| 3.4.2    Desain Variabel .....                                 | 56 |
| 3.4.3    Kekangan.....   | 57 |
| 3.4.4    Pemilihan metode optimasi .....                       | 59 |
| 3.4.5    Algoritma Genetika .....                              | 59 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....                               | 61 |
| 4.1    Perbandingan dengan <i>software</i> komersial .....     | 61 |
| 4.2    Desain variabel terpilih.....                           | 61 |
| 4.3    Desain mesin induksi .....                              | 63 |
| 4.3.1    Stator.....   | 64 |
| 4.3.2    Rotor .....   | 67 |
| 4.4    Parameter motor induksi.....                            | 68 |
| 4.5    Performa motor induksi .....                            | 69 |
| 4.6    Distribusi rugi-rugi.....                               | 71 |
| 4.7 <i>Fitness</i> tiap generasi.....                          | 72 |
| KESIMPULAN DAN SARAN .....                                     | 74 |
| 5.1    Kesimpulan .....  | 74 |
| 5.2    Saran .....   | 76 |
| LAMPIRAN.....  | 81 |

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1 Tipe slot RSBM (kiri) dan ITSM (kanan).....                       | 11 |
| Gambar 2.2 Konstruksi motor induksi.....                                     | 12 |
| Gambar 2.3 Grafik tegangan, torsi, daya, arus terhadap kecepatan motor ..... | 16 |
| Gambar 2.4 Grafik konstanta esson $C_0$ terhadap $Sag$ .....                 | 19 |
| Gambar 2.5 Geometri slot stator .....  | 21 |
| Gambar 2.6 Geometri slot berdasarkan kelas NEMA .....                        | 22 |
| Gambar 2.7: Bagian <i>end ring</i> rotor sangkar tupai.....                  | 24 |
| Gambar 2.8 Fenomena magnetik yang ada pada stator dan rotor.....             | 26 |
| Gambar 2.9 Geometri slot tipe A.....   | 27 |
| Gambar 2.10 Geometri slot tipe B .....                                       | 27 |
| Gambar 2.11 Geometri slot tipe C .....                                       | 28 |
| Gambar 2.12 Geometri slot tipe D.....  | 28 |
| Gambar 2.13 Rugi-rugi daya pada operasi motor induksi .....                  | 30 |
| Gambar 2.14 Contoh fungsi convex .....                                       | 35 |
| Gambar 2.15 Contoh fungsi non-convex .....                                   | 36 |
| Gambar 2.16 Ilustrasi perbedaan gen, kromosom dan populasi .....             | 37 |
| Gambar 2.17 Ilustrasi <i>roulette wheel</i> .....                            | 38 |
| Gambar 2.18 Ilustrasi perbedaan fitness dan delta fitness.....               | 39 |
| Gambar 2.19 Ilustrasi <i>crossover</i> .....                                 | 39 |
| Gambar 2.20 Ilustrasi mutasi .....   | 40 |
| Gambar 3.1 Diagram alir proses penelitian .....                              | 42 |
| Gambar 3.2 Kurva B-H material HF10X.....                                     | 45 |
| Gambar 3.3 Kurva B-P material HF10X .....                                    | 45 |
| Gambar 3.4 Diagram alir proses desain mesin induksi.....                     | 47 |
| Gambar 3.5 Geometri slot stator : <i>tapered slot</i> .....                  | 50 |
| Gambar 3.6 Geometri slot rotor .....   | 52 |
| Gambar 3.7 Diagram alir proses optimasi.....                                 | 55 |
| Gambar 4.1 Dimensi utama mesin induksi .....                                 | 63 |
| Gambar 4.2 Perubahan dimensi slot stator sebelum dan sesudah optimasi.....   | 66 |
| Gambar 4.3 Skema geometri slot stator dengan belitan .....                   | 66 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4.4 Perubahan dimensi slot rotor sebelum dan sesudah optimasi ..... | 67 |
| Gambar 4.5 Ilustrasi dimensi <i>end ring</i> pada rotor .....              | 68 |
| Gambar 4.6 Rangkaian pengganti motor induksi .....                         | 69 |
| Gambar 4.7 Perbandingan distribusi daya motor induksi .....                | 72 |
| Gambar 4.8 <i>Fitness</i> terbaik dan rata-rata pada setiap generasi ..... | 73 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1 Nilai $\lambda$ berdasarkan jumlah <i>pole</i> .....                              | 18 |
| Tabel 2.2 Perbandingan diameter dalam/luar stator .....                                     | 19 |
| Tabel 2.3 Nilai Bg berdasarkan jumlah <i>pole</i> .....                                     | 20 |
| Tabel 2.4: Kombinasi jumlah slot stator dan rotor .....                                     | 22 |
| Tabel 2.5: Efisiensi dan faktor daya motor induksi sangkar tupai 3-fase 4- <i>pole</i> .... | 33 |
| Tabel 2.6 Ilustrasi pencarian $P(\Delta)$ .....   | 39 |
| Tabel 3.1 Spesifikasi SCIM .....  | 44 |
| Tabel 3.2 Karakteristik material HF10X .....  | 45 |
| Tabel 3.3 Karakteristik material alumunium dan tembaga .....                                | 46 |
| Tabel 3.4 Batas atas dan bawah variabel desain mesin induksi .....                          | 48 |
| Tabel 3.5 Konstanta desain belitan stator .....   | 49 |
| Tabel 3.6 Parameter tetap pada slot stator .....  | 51 |
| Tabel 3.7 Parameter tetap pada slot rotor .....   | 52 |
| Tabel 3.8 Desain variabel yang digunakan pada proses optimasi .....                         | 56 |
| Tabel 4.1 Uji validasi model pada program .....   | 61 |
| Tabel 4.2 Variabel desain sebelum dan sesudah proses optimasi .....                         | 62 |
| Tabel 4.3 Dimensi utama sebelum dan sesudah proses optimasi .....                           | 63 |
| Tabel 4.4 Belitan stator sebelum dan sesudah proses optimasi .....                          | 65 |
| Tabel 4.5 Dimensi slot stator sebelum dan sesudah proses optimasi .....                     | 65 |
| Tabel 4.6 Dimensi slot rotor sebelum dan sesudah proses optimasi .....                      | 67 |
| Tabel 4.7 Belitan rotor sebelum dan sesudah proses optimasi .....                           | 68 |
| Tabel 4.8 Parameter pada saat <i>rated</i> sebelum dan sesudah optimasi .....               | 68 |
| Tabel 4.9 Perbandingan performa sebelum dan sesudah optimasi .....                          | 70 |

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Sumber energi yang banyak digunakan di dunia adalah energi fosil yang berupa bahan bakar minyak. Indonesia sendiri saat ini masih sangat bergantung pada energi fosil. Hampir 95% dari kebutuhan energi Indonesia masih disuplai oleh energi fosil [1]. Selain karena keterbatasan ketersediaan, energi fosil juga berdampak negatif terhadap lingkungan. Emisi gas rumah kaca dari pembakaran energi fosil berdampak pada pemanasan global. Dilihat dari sisi pemakai, sektor transportasi merupakan pemakai bahan bakar minyak terbesar, terlebih lagi rata-rata pertumbuhan kendaraan bermotor pada tahun 2006 hingga 2016 di Indonesia sebesar 11,5% per tahun [2]. Salah satu usaha pemerintah Indonesia dalam hal ini adalah adanya Peraturan Presiden (PERPRES) No.55 Tahun 2019 yang baru saja ditetapkan. PP ini dibuat dengan tujuan agar percepatan program kendaraan bermotor listrik dalam negeri untuk transportasi tinggi.

Kendaraan listrik merupakan salah satu solusi yang penting untuk mengurangi polusi dan emisi gas buang akibat penggunaan bahan bakar minyak pada kendaraan bermotor. Salah satu jenis kendaraan listrik yang sedang dikembangkan adalah *golf cart*, jenis kendaraan ini memiliki banyak aplikasi di bandara, rumah sakit, hotel, kampus, tempat wisata dan lain-lain. Banyak bidang penelitian yang mendukung perkembangan kendaraan listrik antara lain teknologi motor listrik, konverter daya, sistem pengaturan berbasis prosesor digital, serta teknologi baterai sebagai penyimpan energi listrik. Sebagai salah satu penunjang perkembangan kendaraan listrik, perlu adanya penelitian yang berfokus pada desain motor listrik yang akan digunakan. Motor listrik berfungsi sebagai pengubah energi listrik yang tersimpan dalam baterai menjadi energi mekanik untuk memutar roda kendaraan. Kriteria motor yang digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik memiliki fokus pada efisiensi dan faktor daya yang tinggi, densitas daya yang besar dan *speed range* yang lebar. Jenis motor yang sering digunakan untuk kendaraan listrik didominasi dengan penggunaan magnet permanen seperti *permanent magnet synchronous motor* (PMSM) dan motor *brushless* DC (BLDC) [3]. Namun, meningkatnya penggunaan magnet permanen sebagai pertumbuhan kendaraan listrik menjadi masalah karena bahan magnet permanen adalah bahan yang hanya tersedia di beberapa negara saja dan harganya relatif mahal. Oleh sebab itu, beberapa pihak beralih

pada motor induksi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan magnet permanen. *Squirrel cage induction motor* (SCIM) adalah jenis motor induksi yang juga sering digunakan pada kendaraan listrik [4]. Desain motor induksi akan digunakan untuk motor kecepatan variabel untuk kendaraan listrik memiliki kekangan dan fokus yang berbeda dengan motor induksi yang digunakan pada industri. Motor induksi dilengkapi dengan tegangan AC, sehingga harus menggunakan inverter untuk mengubah tegangan DC dari baterai serta dapat digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi dengan pengaturan V/Hz dijaga konstan. Pada bidang otomotif terdapat pembagian sistem tegangan rendah dan sistem tegangan tinggi. Pada penelitian ini sistem tegangan rendah digunakan dengan tujuan untuk menghindari bahaya dan kerumitan isolasi sistem tegangan tinggi. Penurunan sistem tegangan juga dapat memperkecil dimensi baterai yang digunakan, serta dapat mengurangi efek pesat perubahan sesaat tegangan terhadap waktu yang akan mempengaruhi masa kerja motor dan keandalan sistem [5].

Apabila dibandingkan dengan motor listrik yang menggunakan material magnet permanen motor induksi memiliki kelemahan dari segi efisiensi dan densitas daya. Maka diperlukan penelitian agar motor induksi dapat bersaing dengan motor magnet permanen lainnya, salah satunya adalah dengan meningkatkan efisiensi motor. Peningkatan efisiensi dapat diupayakan dengan meminimalisir komponen yang memiliki kontribusi terbesar terhadap rugi-rugi daya motor. Rugi-rugi motor induksi terdapat pada lima bagian yakni, rugi-rugi belitan stator, belitan rotor, inti, gesekan, dan *stray* (beban lain-lain) [6]. Dilakukan penelitian untuk mengetahui distribusi rugi-rugi daya pada SCIM. Sehingga fokus optimasi akan dilakukan pada bagian yang memiliki rugi-rugi daya dominan dengan tetap mempertimbangkan kekangan yang berlaku untuk motor listrik pada kendaraan listrik. Permasalahan pada proses desain motor induksi adalah banyaknya variabel dan fungsi yang rumit, sehingga perlu adanya metode optimasi yang sesuai. Beberapa penelitian menggunakan metode optimasi berbasis *metaheuristic* seperti *particle swarm optimization* (PSO) dan *genetic algorithm* (GA) untuk mengoptimalkan desain mesin induksi.

## 1.2 Perumusan Masalah

Desain mesin induksi sangkar tupai dengan sistem tegangan rendah untuk kendaraan listrik memiliki perbedaan dengan desain motor induksi konvensional. Perlu

adanya peningkatan efisiensi motor induksi untuk kendaraan listrik agar mampu bersaing dengan mesin listrik lain. Permasalahan pada proses desain motor induksi adalah banyaknya variabel dan fungsi yang rumit. Diperlukan suatu metode optimisasi untuk menyelesaikan permasalahan desain motor induksi yang cukup kompleks. Teknik optimisasi AG salah satu metode *heuristic* yang dapat menyelesaikan permasalahan desain namun perlu adanya penyesuaian untuk kasus desain mesin induksi.

### 1.3 Keaslian penelitian

Teknik optimisasi adalah bagian yang penting dalam proses *system engineering design*. Studi mengenai optimisasi desain motor induksi sangkar tupai banyak dilakukan dengan berbagai jenis ukuran motor, kegunaan motor, fungsi objektif, variabel, kekangan dan teknik optimisasi yang digunakan. Beberapa peneliti [7]–[15] melakukan proses optimisasi efisiensi pada motor induksi. Pada penelitian [7]–[11] proses optimisasi dilakukan pada motor induksi yang digunakan pada industri, sedangkan untuk penelitian [12]–[15] proses optimisasi lebih fokus pada motor induksi yang digunakan untuk kendaraan listrik.

Dilihat dari fungsi objektif, peneliti [8]–[10], [13], [15] memiliki fungsi multiobjektif seperti efisiensi, torsi, arus, faktor daya dan biaya material. Peneliti [7], [11] memilih efisiensi, biaya material dan torsi nominal sebagai fungsi objektif yang terpisah sehingga dari hasil penelitian [7] menghasilkan dua desain motor berbeda dan pada penelitian [11] menghasilkan tiga jenis desain berbeda. Sedangkan peneliti [12], [14] hanya memiliki efisiensi fungsi objektif. Apabila dilihat dari variabel desain yang digunakan, ada beberapa jenis variabel yang banyak digunakan pada penelitian [7]–[15] seperti variabel  $B_s$ ,  $B_r$ ,  $J_b$  dan  $J_r$ . Variabel  $B_s$  dan  $B_r$  akan mempengaruhi dimensi slot stator dan rotor, variabel  $J_b$  dan  $J_r$  akan mempengaruhi dimensi penampang batang rotor dan *end ring*. Pada [7]–[11] menggunakan variabel desain  $J_{cos}$  dan  $\lambda$ , nilai ini akan menentukan besar penampang dan panjang kawat penghantar yang akan digunakan. Konstrain yang digunakan tergantung pada masing-masing tujuan penggunaan motor induksi. Beberapa peneliti [7]–[15] memilih menggunakan metode algoritma genetika (AG), *particle swarm optimization* (PSO), Hooke-Jeeves, *response surface methode* (RSM) dan *parametric analysis* untuk teknik optimisasi. Metode AG digunakan oleh [7]–[9], [11], [12], [15] untuk proses optimisasi motor induksi dengan berbagai improvisasi. Pada penelitian [7] menggunakan metode AG sebagai teknik optimisasi. Pada [8]



membandingkan dan menggabungkan metode AG *elistism* dan Hooke-Javees sedangkan [9] membandingkan metode NLP dan *improved* AG. Peneliti [11] menggunakan metode GA berbasis *integer coded* untuk menentukan masing-masing fungsi objektif. sedangkan peneliti [12] memilih menggunakan *niching* AG sebagai teknik optimisasi. Peneliti-peneliti yang menggunakan teknik lain seperti [10], [13], [14]. Peneliti [10] menggunakan metode *cost function* dan *goal programming* untuk menentukan keputusan dalam proses desain. Pada penelitian [13] menggunakan metode *respons surface* sebagai teknik optimisasi, metode ini tidak menurunkan formulasi matematis. Peneliti [14] menggunakan analisis parametrik dalam menentukan dimensi dan geometri slot rotor yang paling tepat.

Pada penelitian kali ini, proses optimisasi efisiensi dilakukan pada motor induksi untuk kendaraan listrik seperti yang sudah dilakukan oleh [13]–[16]. Proses pengoptimalan efisiensi dilakukan dengan meminimalisir rugi-rugi daya yang berkontribusi besar terhadap rugi-rugi total. Sehingga fungsi tujuannya adalah jumlahan dari rugi-rugi belitan dan inti dari stator dan rotor. Rugi-rugi belitan stator akan dipengaruhi oleh variabel  $J_{cos}$ ,  $B_g$  dan  $\lambda$  karena berhubungan dengan resistansi belitan stator, peneliti [7]–[11] juga menggunakan variabel-variabel ini pada proses optimisasi. Rugi-rugi belitan rotor akan dipengaruhi oleh variabel  $J_b$  dan  $J_r$  karena berhubungan dengan resistansi belitan rotor, pada [7]–[15] juga menggunakan variabel ini. Sedangkan rugi-rugi inti dipengaruhi oleh variabel  $\lambda$  karena berhubungan dengan dimensi inti. Selain variabel  $\lambda$ , nilai  $B_{tsr}$ ,  $B_{csr}$  juga mempengaruhi rugi-rugi inti, Namun pada penelitian kali ini, variabel-variabel tersebut dijaga konstan untuk mengurangi kompleksitas dan kecepatan komputasi. Fungsi kekangan yang terpilih adalah torsi *breakdown*, slip, faktor daya, arus awal, torsi awal dan berat mesin.

Teknik optimisasi yang akan digunakan dalam proses penelitian kali ini adalah AG berbasis *integer coded* seperti yang sudah dilakukan [7], [11], [15]. Menambahkan proses *elitsm* [8] untuk mendapatkan generasi baru yang baik. Melakukan pembaharuan dalam proses mendapatkan generasi baru yang lebih baik dan bervariasi tinggi agar mempercepat proses komputasi dan mencegah solusi terjebak dalam optimum lokal. Detail perbedaan pemilihan fungsi objektif, variabel desain, kekangan dan metode optimisasi dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Table 1.1 Keaslian penelitian

| Judul Penelitian  | SCIM<br>untuk<br>EV | Optimalisasi |            |    |            |    |      | Desain Variabel |    |               |           |                    | Kekangan   | Metode                                 |
|---|---------------------|--------------|------------|----|------------|----|------|-----------------|----|---------------|-----------|--------------------|--|--|
|   |                     | Eff          | p.u<br>Tbk | Tn | ILR<br>TLR | pf | cost | Jcos            | Bg | Btrs,<br>Bcrs | $\lambda$ | Jer dan<br>atau Jb |  |  |
| <i>Optimal Design of Induction Motor using Genetic Algorithm and Comparision with Conventionally Designed Induction Motor [7]</i> | -                   | √            | -          | -  | -          | -  | √    | √               | -  | √             | √         | √                  | Temp, TLR, pf, Sn, power density                         | GA                                     |
| <i>Multi-Objective Design Optimization of Three Phase Induction Motor using Hooke and Jeeves Method &amp; GA [8]</i>              | -                   | √            | -          | √  | √          | √  | √    | √               | √  | √             | √         | √                  | TLR, ILR, Tbk, slip, pf, Temp                            | Hooke and Jeeves Method & GA           |
| <i>Design Optimization of 7.5 Kw 4 pole 3phase 50 Hz IM Employing GA_improve AG Using Sweep Frequency Response Analysis [9]</i>   | -                   | √            | -          | √  | -          | √  | √    | √               | -  | √             | √         | √                  | Penalty factor   | Improved GA                            |
| <i>Multiobjective Optimization Techniques for the Design of Induction Motors [10]</i>   | -                   | √            | -          | -  | √          | -  | √    | √               | -  | √             | √         | √                  | Temp belitan stator, rotor bar ; Bts Btr, Slip, TLR, ILR | Cost function method, Goal programming |
| <i>Design Optimization of induction motor by algorithm and comparison with existing</i>   | -                   | √            | -          | √  | -          | -  | √    | -               | √  | √             | √         | √                  | Pu.Tbk, pu.ILR pf, Bts, Bcrs                             | GA                                     |

| <i>motor</i> [11]   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |                                     |                               |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------------------------------------|-------------------------------|
| <i>Induction motor design for electric vehicle using a niching genetic algorithm</i> [12]   | √ | √ | - | - | - | - | - | - | - | √ | - | √ | Eff@peak<br>pf@peak,<br>cost, temp  | Niching GA                    |
| <i>NEMA class A slot shape optimization of induction motor for electric vehicle using response surface method</i> [13]                                      | √ | √ | - | √ | - | - | - | - | - | √ | - | √ | Design area                         | Response<br>surface<br>method |
| <i>Slot Optimization Design of Induction Motor for Electric Vehicle</i> [14]  | √ | √ | - | - | - | - | - | - | - | √ | - | √ | Eff, pf, TLR                        | Parametric<br>analysis        |
| <i>Optimal design of stator and rotor slot of induction motor for electric vehicle Applications</i> [15]  | √ | √ | √ | - | - | √ | - | - | - | √ | - | √ | Bg, Jcos,Jb,<br>Btsr,Bcsr           | GA                            |
| Optimasi Desain Motor Induksi Sangkar Tupai 3 Fase 50Hz 5HP 48V dengan Metode <i>Genetic Algorithm</i> Sebagai Penggerak Kendaraan Listrik <i>Golf Cart</i> | √ | √ | - | - | - | - | - | √ | √ | - | √ | √ | Tbk, slip, pf,<br>pu.ILR,pu.<br>TLR | GA                            |

Keterangan :

p.u Tbk : Torsi *breakdown* perunit, Tn: Torsi nominal, ILR:Arus *locked rotor*; Jcos: Densitas arus stator, Bg: Densitas fluks celah udara,  $\lambda$ : *stack length ratio*, Jer: Densitas *end ring*, Jb: Densitas batang konduktor, Pf : faktor daya, TLR: Torsi *locked rotor*; Bts,r: Densitas fluks gigi stator dan rotor, Bcs,r: Densitas fluks inti stator dan rotor., Sn: *rated slip*

#### **1.4 Tujuan penelitian**

Memperoleh efisiensi optimal motor induksi sangkar tupai sistem tegangan rendah untuk kendaraan listrik menggunakan metode AG dengan mempertimbangkan keadaan yang ada, sehingga didapatkan nilai variabel desain dan desain motor induksi sangkar tupai sistem tegangan rendah untuk kendaraan listrik yang optimal.

#### **1.5 Manfaat penelitian**

Manfaat penelitian diharapkan dapat dijadikan sebagai referensi literatur penelitian mengenai optimasi desain motor induksi juga dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam mendesain motor induksi untuk kendaraan listrik dengan tujuan mendapatkan performa motor yang baik.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan pustaka

Motor induksi merupakan salah satu peralatan yang banyak digunakan di industry, rumah tangga dan transportasi. Penelitian mengenai optimisasi motor induksi yang digunakan untuk industri atau lainnya juga sudah pernah dilakukan oleh [7]–[11]. Metode optimisasi yang digunakan adalah genetika algoritma (AG), Hooke-Jeeves. Peneliti [7] memaksimalkan efisiensi dan biaya produksi secara terpisah. Proses optimasi dilakukan dengan cara merubah berbagai besaran magnetis dan mekanis diantaranya adalah densitas arus stator, rotor, densitas fluks rotor dan kedalaman rotor. Fungsi kekangan berupa kenaikan temperatur, torsi awal, slip dan densitas daya. Peneliti memilih menggunakan AG untuk menyelesaikan proses optimasi. Hasil optimasi diperoleh dua desain motor dengan efisiensi terbaik dan biaya produksi terendah.

Peneliti [8] juga memilih efisiensi dan biaya sebagai fungsi tujuan dengan mempertimbangkan arus awal, arus torsi, torsi pullout, slip, faktor daya dan suhu. Variabel desain yang dipilih ada 11 variabel yaitu diameter dan panjang stator, kedalaman dan lebar slot stator rotor, panjang dan lebar *end ring*, diameter dan densitas celah udara. Peneliti menggunakan metode AG *elitism* dan Hooke & Javes. Dalam proses seleksi pada AG dites dengan metode *elitism*, *roulette wheel* dan *tournament selection*, ketiga metode seleksi menunjukkan hasil yang hamper sama. Pada penelitian ini, hasil optimasi memiliki nilai yang hamper sama dengan nilai terkaan awal. Hal tersebut menunjukkan kurangnya varietas individu pada proses pencarian individu baru. Hasil optimasi dibandingkan dengan hasil desain manual dan desain optimasi dengan menggunakan metode AG dan Hooke & Javes.

Pada [9] memilih untuk memaksimal efisiensi dan meminimalkan harga material dalam satu desain motor induksi. Dengan menggunakan 13 variabel desain yaitu panjang inti stator, diameter dalam inti stator, lebar celah udara, jumlahan konduktor stator, kedalaman slot stator dan rotor, lebar slot stator dan rotor, densitas fluks rata-rata, belitan stator dan batang rotor. Konstrain optimasi berupa pertidaksamaan dari beberapa nilai, seperti slip, densitas fluks inti stator rotor, densitas fluks gigi inti stator dan rotor, arus awal perunit, torsi awal perunit, torsi *breakdown* perunit, faktor daya dan efisiensi. Metode yang digunakan adalah NLP dan AG. Hasil optimasi dibandingkan dengan hasil

desain manual dan desain optimasi dengan menggunakan metode NLP dan AG. Kemudian ketiga desain dilakukan validasi terhadap respon *transient*.

Penelitian [10] memiliki fungsi objektif yang saling bertentangan yaitu meminimalkan biaya manufaktur, memaksimalkan efisiensi, faktor daya dan meminimalkan arus awal. Variabel yang diubah panjang stator, diameter dalam stator, kedalaman dan lebar slot stator rotor, ukuran kawat belitan stator dan jumlah konduktor setiap slot. Fungsi kekangan yang dipilih adalah temperatur belitan stator dan batang rotor, densitas flux gigi stator dan rotor, slip, arus awal, torsi awal, torsi *breakdown*, faktor daya dan *fill factor* dari slot. Pada penelitian tersebut digunakan metode *cost function* dan *goal programming* untuk menentukan pengambilan keputusan dalam proses desain.

Peneliti [11] memiliki beberapa fungsi objektif yang terpisah yaitu efisiensi, torsi nominal dan biaya produksi. Variabel desain yang dipilih adalah jumlah belitan per fase, diameter luar, diameter dalam dan panjang stator, kedalaman dan lebar slot stator, diameter batang rotor, lebar *end ring*, dan celah udara. Fungsi kekangan yang dijadikan pertimbangan adalah slip, densitas inti stator dan rotor, densitas gigi stator dan rotor, faktor *filling* slot stator,  $P_u$  arus *starting* dan  $P_u$  torsi *starting*. Peneliti ini menggunakan metode AG pada masing-masing fungsi objektif, sehingga diperoleh 3 desain untuk merepresentasikan desain yang memiliki efisiensi maximum, torsi maximum dan biaya produksi minimum.

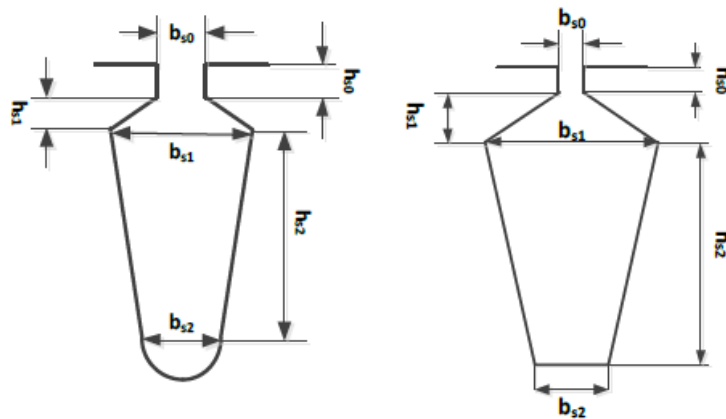
Secara umum motor yang digunakan pada industri biasanya tidak beroperasi pada siklus kerja yang ekstrem, sedangkan motor untuk aplikasi kendaraan listrik harus sesuai dengan pola penggerak yang dapat memenuhi perbedaan kecepatan dan karakteristik torsi. Misalnya daerah operasi torsi tetap dibutuhkan pada saat kendaraan melakukan *starting* dan menaiki jakan yang menanjak sedangkan daerah operasi daya tetap dibutuhkan pada saat kendaraan berlaju pada kecepatan tinggi. Secara umum motor induksi untuk kendaraan listrik diperlukan untuk mengontrol kecepatan dalam rentang yang luas pada daerah operasi daya tetap, hal itu dapat diperoleh dengan cara meningkatkan nilai torsi *breakdown* pada saat kecepatan *base*. Hal ini akan menjadi salah satu pertimbangan dalam proses desain motor induksi untuk kendaraan listrik. Beberapa hal lain yang dibutuhkan motor induksi untuk kendaraan listrik diantaranya memiliki adalah efisiensi, faktor daya dan densitas daya (kW/kg) [3][16].

Studi yang fokus pada desain motor induksi sebagai penggerak kendaraan listrik sudah pernah dikaji [17]–[24]. Pada kendaraan listrik, motor induksi didesain untuk kecepatan variabel [17]. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan [18], desain motor induksi kendaraan listrik tidak lagi berfokus pada besar torsi awal yang dihasilkan dan besar arus awal yang dibutuhkan karena kedua nilai tersebut dapat dicapai dengan pengaturan tegangan dan frekuensi awal yang sesuai. Penelitian desain motor induksi untuk kecepatan variabel memiliki fokus pada lebarnya jangkauan kecepatan yang dihasilkan [19][20]. Peneliti [25][21] menggunakan motor induksi dengan sistem tegangan rendah pada pengaplikasian kendaraan listrik. Pada penelitian [22] melakukan studi perbaikan efisiensi dan densitas daya untuk motor induksi dengan cara membelit ulang belitan stator. Peneliti [23] melakukan studi model matematis untuk perhitungan rugi-rugi pada motor induksi yang digunakan pada kendaraan listrik. Peneliti [24] melakukan penelitian pengaruh struktur slot rotor terhadap performa torsi awal dan efisiensi motor induksi.

Setelah studi mengenai kendaraan listrik dilakukan, penelitian untuk optimisasi motor induksi sebagai penggerak kendaraan listrik juga sudah dilakukan oleh beberapa peneliti [12]–[15], baik dengan satu fungsi objektif atau lebih. Metode yang digunakan adalah *genetic algorithm* (GA), *niching genetic algorithm*, *response surface method* dan *parametric analysis*. Peneliti [12] memilih efisiensi sebagai fungsi objektif (tujuan) dengan cara mengatur variabel desain  $B_{tsr}$ ,  $B_{csr}$ ,  $J_b$  dan  $J_r$  dan memperhatikan nilai efisiensi dan faktor daya saat maksimum, biaya material dan suhu. Metode yang digunakan pada penelitian tersebut adalah *Niching AG* yang mengadopsi *restricted competition selection* (RCS) yaitu pengembangan metode AG dengan menggunakan multimodal. Pada skenario solusi optimal menyebar di beberapa titik hal ini mencegah solusi untuk terjebak pada optimal lokal. Peneliti [13] memilih efisiensi dan torsi pada setiap kecepatan sebagai fungsi tujuan. Karakteristik torsi pada masing-masing kecepatan menjadi hal yang penting untuk motor induksi kecepatan variabel. Desain variabel yang digunakan pada penelitian adalah beberapa parameter pada geometri slot rotor seperti kedalaman dan lebar slot rotor. Perubahan parameter ini dilakukan dengan tidak merubah tipe bentuk slot rotor. Metode yang dipilih adalah *response surface method* yang sudah banyak digunakan pada optimasi desain teknik. RSM umumnya didasarkan pada sekelompok titik pengambilan sampel dari sebuah model desain fisik sehingga proses

optimasi tidak dilakukan dengan formulasi matematis. Kekangan didasari oleh adanya desain area yang sudah ditentukan oleh peneliti.

Pada [14], memaksimalkan efisiensi motor induksi untuk kendaraan listrik dengan cara merubah parameter pada dua tipe bentuk slot rotor. Tipe slot yang digunakan adalah *round bottom slot* (RSBM) dan *inverted trapezoid slot* (ITSM), ilustrasi kedua bentuk slot dapat dilihat pada Gambar 2.1. Metode yang digunakan adalah analisis parametrik. Pada penelitian kali ini analisis parametrik dilakukan dengan cara memvariasikan enam parameter input pada geometri slot rotor, kemudian melakukan analisis respon dari setiap parameter input. Dari hasil tersebut akan dipilih jenis varian desain yang memiliki performa terbaik dilihat dari segi efisiensi dan torsi. Peneliti [15] menggunakan tiga fungsi objektif atau tujuan yaitu efisiensi, torsi *breakdown* dan biaya produksi. Desain variabel yang digunakan adalah parameter-parameter pada geometri slot rotor dan stator. Proses desain mempertimbangkan nilai besaran magnetis seperti densitas fluks celah udara, inti stator, inti rotor, gigi stator, gigi rotor dan densitas arus stator juga rotor. Masing-masing besaran memiliki batas minimum dan maksimum. Metode yang digunakan adalah algoritma genetika dengan *integer coded*.



Gambar 2.1 Tipe slot RSBM (kiri) dan ITSM (kanan) [14]

Pada penelitian kali ini, proses optimasi efisiensi dilakukan pada motor induksi untuk kendaraan listrik seperti yang sudah dilakukan oleh [13]–[16]. Proses pengoptimalan efisiensi dilakukan dengan meminimalisir rugi-rugi daya yang berkontribusi besar terhadap rugi-rugi total. Sehingga fungsi tujuannya adalah jumlahan dari rugi-rugi belitan dan inti dari stator dan rotor. Rugi-rugi belitan stator akan dipengaruhi oleh variabel  $J_{cos}$ ,  $B_g$  dan  $\lambda$  karena berhubungan dengan resistansi belitan

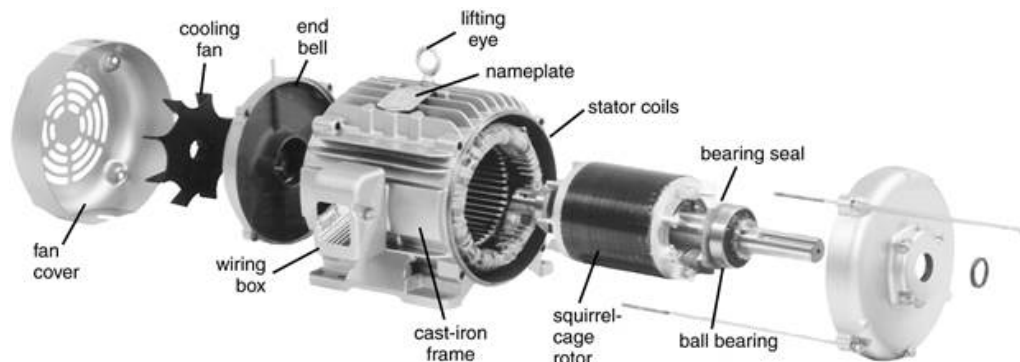


stator yang juga digunakan peneliti [7]–[11]. Rugi-rugi belitan rotor akan dipengaruhi oleh variabel  $J_b$  dan  $J_r$  yang juga digunakan pada [7]–[15]. Sedangkan rugi-rugi inti dipengaruhi oleh variabel  $\lambda$ . Selain variabel  $\lambda$ , nilai  $B_{tsr}$ ,  $B_{csr}$  juga mempengaruhi rugi-rugi inti, Namun pada penelitian kali ini, variabel-variabel tersebut dijaga konstan untuk mengurangi kompleksitas dan kecepatan komputasi. Rugi-rugi mekanis dan tambahan pada motor induksi untuk kendaraan listrik dijaga tetap dengan menggunakan formulasi matematis pada penelitian [22], [23]. Fungsi keekonomian yang terpilih adalah torsi *breakdown*, slip, faktor daya, arus awal, torsi awal dan berat mesin.

Teknik optimasi yang akan digunakan dalam proses penelitian kali ini adalah AG berbasis *integer coded* seperti yang sudah dilakukan [7], [11], [15]. Melakukan pembaharuan dalam proses mendapatkan generasi baru yang lebih baik dan bervariasi tinggi agar mempercepat proses komputasi dan mencegah solusi terjebak dalam optimum lokal. Metode AG akan menggunakan proses metode *elitsm* [8] dan *roulette wheel* secara bersamaan untuk mendapatkan generasi baru yang baik.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Motor induksi



Gambar 2.2 Konstruksi motor induksi[26]

Motor induksi merupakan motor listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau energi gerak. Motor induksi sangatlah mudah dari aspek perawatannya serta dari segi harganya juga lebih murah dibandingkan dari jenis motor yang lainnya. Motor induksi terbagi menjadi dua jenis yakni, motor induksi rotor sangkar tupai (*squirrel cage*) motor induksi rotor lilit (*wound rotor*). Rotor sangkar tupai memiliki kelebihan dibandingkan rotor lilit yakni lebih murah, handal serta konstruksinya lebih kuat. Motor

induksi memiliki beberapa komponen penyusun yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 tiga komponen utama diantaranya yakni

- 1) Stator : merupakan bagian yang diam dan memiliki kumparan yang dapat menginduksikan medan magnet elektromagnetik kepada kumparan rotornya.
- 2) Celah Udara : merupakan celah udara. Tempat berpindahnya energi dari stator ke rotor.
- 3) Rotor : merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.

Cara kerja motor induksi didasari oleh hukum faraday dan Lenz, “*Setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menyebabkan gaya gerak listrik (GGL) induksi yang sebanding dengan laju perubahan fluks*”. Secara matematis hukum faraday dapat diformulasikan dengan persamaan (2.1). GGL ( $\varepsilon$ ) induksi yang dihasilkan oleh perubahan fluks ( $\Delta\phi$ ) dalam selang waktu tertentu ( $\Delta t$ ) yang nilainya sebanding dengan jumlah belitan ( $N$ ), sedangkan tanda negatif menandakan arah GGL induksi.

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Motor induksi bekerja diawali dengan fluks bolak-balik yang diproduksi oleh belitan stator yang dialiri arus AC. Fluks bolak balik berputar dengan kecepatan sinkron yang besarnya sebanding dengan frekuensi dan berbanding terbalik dengan jumlah *pole*, seperti yang ditunjukkan pada formulasi (2.2). fluks ini disebut fluks putar atau medan putar atau *rotating magnetic field* (RMF). Kecepatan relatif antara RMF stator dan kumparan rotor yang telah dihubung singkat (rangkaian tertutup) menyebabkan adanya GGL induksi sehingga timbul arus pada konduktor rotor. Arus induksi di rotor juga akan menghasilkan fluks bolak-balik di sekitarnya. Fluks rotor ini tertinggal (*lagging*) terhadap fluks stator. Arah arus rotor yang diinduksi cenderung berlawanan dengan arah sumbernya. Menurut hukum Lenz, “*Gaya Gerak Listrik atau GGL induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetnya berlawanan dengan asal perubahan fluks*”. Oleh karena itu, terdapat tanda negatif “-” pada formulasi hukum Faraday.

Adanya arus pada rotor di medan magnet akan menimbulkan gaya ( $F$ ) pada rotor. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya ( $F$ ) pada rotor yang cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator. Tegangan dapat terinduksi jika ada perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan berputar rotor ( $n_r$ ). Perbedaan kecepatan antara  $n_r$  dan  $n_s$  disebut slip

(S) yang dinyatakan pada formulasi (2.3). Bila kecepatan stator dan rotor memiliki nilai yang sama, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak akan mengalir pada kumparan rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel.

$$n_{stator} = \frac{120f}{p} \quad (2.2)$$

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Klasifikasi motor induksi

Standar NEMA pada dasarnya mengkategorikan motor induksi ke dalam empat kelas yakni desain A,B,C, dan D grafik karakteristik torsi terhadap kecepatan dapat dilihat pada Gambar 2.2.

1. Kelas A: Memiliki torsi *start* normal (150 – 170%) dari nilai *rated*nya dan arus *start* relatif tinggi. *Torsi break down* nya paling tinggi dari semua desain NEMA. Mampu menangani beban lebih dalam jumlah besar selama waktu yang singkat. Slip motor desain ini  $\leq 5\%$ .
2. Kelas B : Digunakan untuk keperluan umum mempunyai torsi *starting* normal dan arus *starting* normal, regulasi kecepatan putar pada saat *full load* rendah dibawah 5% dan torsi *starting* sekitar 150% dari *rated*, walaupun arus *starting* normal biasanya mempunyai besar 600% dari *full load*. Slip motor desain ini  $\leq 5\%$ . Efisiensi dan faktor dayanya pada saat berbeban penuh tinggi sehingga desain ini merupakan yang paling populer.
3. Kelas C : Mempunyai torsi *starting* yang lebih besar dibandingkan motor kelas B, arus *starting* normal, slip kurang dari 0,05 pada kondisi *full load*, torsi *starting* sekitar 200% dari *rated*. Operasi dari motor ini mendekati kecepatan penuh tanpa *overload* dalam jumlah besar. Arus *start*nya rendah, slipnya  $\leq 5\%$ .
4. Kelas D : Memiliki torsi *start* yang paling tinggi. Arus *start* dan kecepatan beban penuhnya rendah. Memiliki nilai slip yang tinggi (5 -13 %).