

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan Listrik Ringan atau *Light Electric Vehicle* (LEV) merupakan kategori kendaraan bertenaga listrik yang dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan mobilitas jarak dekat hingga menengah, khususnya di kawasan perkotaan. Perkembangan kendaraan listrik ini terus didorong untuk mencapai mobilitas yang efisien dan ramah lingkungan. Sistem penggerak utama (*main drive*) pada LEV menuntut penggunaan motor dengan efisiensi tinggi, kepadatan daya yang besar, serta struktur yang ringkas. Di antara berbagai jenis motor listrik, motor *Brushless DC* (BLDC) menjadi salah satu pilihan. Motor BLDC memiliki keunggulan berupa rasio torsi terhadap inersia yang sangat baik, tidak adanya rugi-rugi sikat (*brush*), dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan motor DC konvensional maupun motor induksi [1][2].

Dalam pengoperasiannya sebagai penggerak kendaraan, motor listrik dihadapkan pada kondisi jalan yang sangat dinamis. Siklus berkendara pada area perkotaan sering kali didominasi oleh operasi *start stop*, percepatan mendadak, serta variasi kontur jalan yang memberikan perubahan torsi beban secara fluktuatif. Oleh karena itu, motor BLDC pada LEV dituntut untuk memiliki respons dinamis yang sangat cepat dan stabil. Karakteristik ini krusial untuk menghasilkan torsi awal yang tinggi pada kecepatan rendah serta kemampuan beradaptasi terhadap perubahan beban mekanis secara tiba-tiba tanpa kehilangan stabilitas putaran[3][4].

Secara konvensional, pengendalian kecepatan dan komutasi arus pada motor BLDC sangat bergantung pada penggunaan sensor posisi rotor fisik, seperti *Sensor Hall-effect*. Namun, pengaplikasian sensor fisik pada sistem traksi kendaraan listrik menimbulkan beberapa kelemahan yang signifikan. Lingkungan operasional kendaraan yang keras seperti paparan getaran tinggi, fluktuasi suhu yang ekstrem, serta kotoran dapat menurunkan tingkat keandalan dan umur pakai sensor secara drastis. Di samping itu, penambahan komponen sensor beserta instalasi kabelnya akan meningkatkan kompleksitas desain, memakan ruang lebih besar, serta menambah biaya produksi sistem penggerak secara keseluruhan[5][6].

Untuk mengatasi kelemahan sistem bersensor tersebut, teknologi *Sensorless Control* (kendali tanpa sensor) telah menjadi fokus pengembangan utama dalam sistem penggerak modern. Berbagai metode telah diusulkan untuk mengestimasi posisi rotor dan kecepatan motor, mulai dari metode *Zero-Crossing Back-EMF* hingga algoritma berbasis pengamat (*observer*) yang kompleks seperti *Sliding Mode Control* (SMC)[7].

Meskipun sistem *sensorless* secara efektif mampu meningkatkan keandalan perangkat keras, tantangan terbesar dari implementasinya adalah menjaga sistem kontrol agar tetap stabil dan mempertahankan performa respons dinamis yang tinggi seperti meminimalkan *overshoot*, *rise time*, dan *settling time* terutama saat motor beroperasi pada kecepatan rendah atau saat terjadi gangguan fluktuasi beban yang ekstrem[8].

Sebagai solusi atas tantangan tersebut, salah satu metode *sensorless control* yang sangat andal untuk aplikasi industri adalah teknik pemantauan fluks (*Metode Flux Threshold*). Teknologi kendali ini menawarkan keunggulan dalam mengestimasi fluks magnetik secara presisi dengan cara mengintegrasikan tegangan *back electromagnetic Field*: BEMF, sehingga dapat menentukan titik komutasi yang optimal bahkan ketika amplitudo *back-EMF* masih sangat kecil di kecepatan rendah. Implementasi algoritma *Metode Flux Threshold* pada perangkat keras (*hardware*) memungkinkan motor beroperasi dengan transisi yang lebih halus dan memberikan kemudahan dalam proses *tuning* parameter kendali tanpa memerlukan intervensi sensor mekanis[9].

Meskipun metode *Metode Flux Threshold* menjanjikan tingkat akurasi dan stabilitas yang tinggi, kajian spesifik mengenai evaluasi parameter respons dinamis secara praktik pada perangkat keras motor secara aktual masih perlu diperdalam. Secara khusus, analisis performa transien saat dihadapkan pada variasi beban yang merepresentasikan dinamika aktual Kendaraan Listrik Ringan (LEV) belum banyak dilakukan secara komprehensif. Penggunaan motor *Brushless DC* (BLDC) pada LEV menuntut keandalan tinggi dalam menghadapi kondisi beban jalanan yang sangat dinamis dan fluktuatif. Untuk menjaga stabilitas saat terjadi perubahan traksi secara tiba-tiba, pemilihan arsitektur sistem kendali menjadi faktor krusial yang langsung memengaruhi kualitas respons motor. Terdapat beberapa pendekatan yang umum diterapkan, yaitu pengendalian kecepatan (*velocity control*), pengendalian arus atau torsi (*current control*), serta pengendalian kaskade (*cascade control*) yang mengintegrasikan *loop* arus di dalam *loop* kecepatan. Mengingat setiap arsitektur memiliki karakteristik peredaman gangguan dan waktu tanggap yang berbeda-beda, analisis mendalam untuk membandingkan performa respons transien dari ketiga metode tersebut sangat diperlukan guna menentukan strategi operasional yang paling optimal.

Selain pemilihan arsitektur kendali, tantangan kritis lainnya dalam pengaplikasian motor BLDC berbasis *sensorless* pada LEV adalah mempertahankan batas stabilitas operasional, khususnya pada rentang kecepatan rendah. Pada fase ini, amplitudo tegangan induksi (*back-EMF*) umumnya sangat kecil dan rentan terhadap gangguan sinyal (*noise*), yang berpotensi memicu kegagalan komutasi. Di samping itu, dinamika operasional LEV di jalan raya sangatlah fluktuatif seperti saat melewati tanjakan, jalan berlubang, atau perubahan traksi mendadak yang merepresentasikan gangguan torsi mendadak (*load disturbance*). Oleh karena itu, sangat penting untuk

mengkaji sejauh mana sistem mampu meredam lonjakan beban tersebut tanpa menyebabkan motor kehilangan torsi atau berhenti berputar (*stall*). Berdasarkan celah penelitian dan tantangan operasional tersebut, pengujian secara langsung (*real-time*) menggunakan bantuan perangkat lunak antarmuka InstaSPIN-BLDC sangat diperlukan untuk memonitor respons transien dan menyimulasikan keadaan beban aktual, sehingga keandalan dan kelayakan sistem penggerak dapat dievaluasi secara komprehensif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengevaluasi karakteristik respons dinamis (meliputi *delay time*, *rise time*, *peak time*, *maximum overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*) dari motor BLDC yang dikendalikan menggunakan metode *sensorless control* berbasis *Metode Flux Threshold*?
2. Bagaimana perbandingan performa respons transien motor BLDC saat dioperasikan pada arsitektur pengendalian kecepatan (*velocity control*), pengendalian arus/torsi (*current control*), dan pengendalian kaskade (*cascade control*)?
3. Berapa batas kemampuan stabilitas operasi motor pada rentang kecepatan rendah, serta kemampuan sistem kendali dalam meredam gangguan torsi mendadak (*load disturbance*) yang merepresentasikan dinamika kendaraan listrik ringan?

1.3 Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Membangun sebuah sistem simulasi untuk dapat mengamati karakteristik, respons dinamis, dan stabilitas motor BLDC secara eksperimental dalam kondisi mode kendali tanpa sensor (*sensorless control*) berbasis pemantauan fluks (*Metode Flux Threshold*).
2. Melakukan eksperimental untuk mengamati karakteristik respons dinamis motor BLDC dalam pengendalian kecepatan, arus/torsi, dan kaskade.
3. Menguji batas stabilitas operasi pada kecepatan rendah dan mengukur kemampuan sistem kendali dalam merespons gangguan beban (*load disturbance*) yang menyimulasikan kondisi operasional kendaraan listrik ringan.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih fokus, mendalam, dan terarah, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Objek pengujian menggunakan perangkat keras (fisik) motor *Brushless DC* (BLDC) tipe 57BLF03 secara langsung yang dioperasikan tanpa sensor posisi fisik (*sensorless control*).
2. Alat bantu yang digunakan untuk mengimplementasikan algoritma estimasi *Metode Flux Threshold* serta menganalisis data respons dinamis motor adalah antarmuka perangkat lunak InstaSPIN-BLDC dari Texas Instruments.
3. Parameter analisis respons dinamis dibatasi pada enam indikator utama, yaitu: *delay time* (t_d), *rise time* (t_r), *peak time* (t_p), *maximum overshoot* (M_p), *settling time* (t_s), dan *steady-state error* (e_{ss}).
4. Pengaturan kecepatan dan simulasi pembebanan (yang merepresentasikan profil beban Kendaraan Listrik Ringan) diatur dan diinjeksikan secara elektronik melalui antarmuka *software* pengujian ke perangkat keras motor aktual.
5. Penelitian ini berfokus pada pengujian performa kontrol dan respons motor, sehingga tidak membahas perancangan (*design*) topologi *hardware inverter* dari awal.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dan manfaat yang signifikan, baik dari segi teoretis maupun praktis, yaitu:

1. Manfaat Teoretis (Akademis)

- Memperkaya Kajian Literatur: Menambah khazanah keilmuan di bidang sistem kendali penggerak motor listrik (*electric drives*), khususnya terkait analisis karakteristik dinamis motor BLDC menggunakan metode *sensorless control* berbasis *Metode Flux Threshold*.
- Validasi Arsitektur Kendali: Memberikan pemahaman dan pembuktian empiris yang komprehensif mengenai perbandingan performa arsitektur pengendalian arus (*current control*), pengendalian kecepatan (*velocity control*), dan pengendalian kaskade (*cascade control*) saat dihadapkan pada gangguan transien.

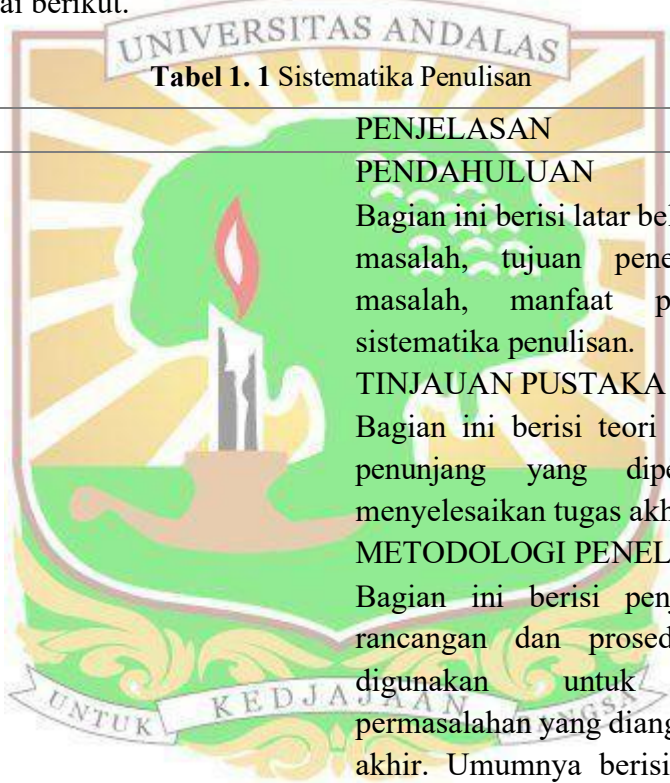
2. Manfaat Praktis (Aplikatif)

- Rujukan Desain Sistem Traksi EV: Menjadi referensi yang valid bagi para peneliti, insinyur, maupun praktisi industri otomotif dalam merancang dan mengevaluasi keandalan sistem penggerak utama (*main drive*) tanpa sensor fisik pada Kendaraan Listrik Ringan (*Light Electric Vehicle*).

- Optimalisasi dan *Tuning* Perangkat Keras: Memberikan panduan praktis dan wawasan mengenai keandalan metode estimasi fluks dalam mengatasi transisi beban yang ekstrem, sehingga dapat dijadikan acuan dalam melakukan *tuning* parameter kendali pada perangkat keras (*hardware*) *controller* agar kendaraan beroperasi lebih stabil, mulus, dan efisien.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan proposal tugas akhir dilakukan secara sistematis yang setiap babnya memiliki tujuan dalam menyampaikan hal tertentu. Hal ini dilakukan agar pembaca dapat memahaminya dengan mudah. Sistematika penulisan proposal tugas akhir dijelaskan sebagai berikut.



Tabel 1. 1 Sistematika Penulisan

BAB	PENJELASAN
BAB I	PENDAHULUAN Bagian ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA Bagian ini berisi teori dasar dan ilmu penunjang yang diperlukan dalam menyelesaikan tugas akhir.
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN Bagian ini berisi penjelasan tentang rancangan dan prosedur yang akan digunakan untuk memecahkan permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir. Umumnya berisi rentang waktu penelitian dan digram alir rencana penelitian.