

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis respons dinamis motor BLDC menggunakan metode *sensorless control* berbasis *Flux Threshold* via InstaSPIN-BLDC, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Validitas dan Karakteristik Respons Dinamis *Sensorless Control*

Metode *sensorless control* metode Flux Threshold terbukti andal, konsisten, dan *speed-independent* pada rentang 500–2500 RPM tanpa kegagalan komutasi. Sistem beroperasi sangat presisi dengan nilai *steady-state error* (e_{ss}) dominan di bawah 2% (maksimal 2,59% pada 500 RPM), meskipun terdapat osilasi minor bawaan pada fase *start-up* karena algoritma membutuhkan waktu komputasi adaptif sebelum sinyal *Back-EMF* terbaca sempurna.

2. Perbandingan Performa Arsitektur Sistem Kendali

Mode Kendali Gabungan (Lup Ganda / *Cascade*) terbukti sebagai topologi paling optimal dan aman untuk LEV. Mode ini berhasil menutupi kelemahan dari Mode Kecepatan (respons instan namun tanpa proteksi arus) dan Mode Arus (membatasi arus namun rentan *overspeed/stall*). Meski menghasilkan *overshoot* transien (maksimal 13,28% pada 500 RPM), Mode Gabungan mengunci kecepatan dengan presisi tinggi sekaligus memproteksi perangkat keras dari arus kejut.

3. Batas Stabilitas Kecepatan Rendah dan Redaman Gangguan Beban

Batas stabilitas kecepatan rendah sangat bergantung pada penalaan *gain* PI. Kinerja paling ideal dicapai pada Gain Optimal ($K_p = 1,0$; $K_i = 15$) dengan batas stabilitas 380 RPM dan presisi tertinggi ($e_{ss} = 0,39\%$). Sebagai perbandingan, *gain* tinggi terbatas di 420 RPM ($e_{ss} = 0,69\%$), sedangkan *gain* rendah mencapai 310 RPM namun akurasinya menurun ($e_{ss} = 1,61\%$) dan berisiko *loss of sync*. Terhadap gangguan beban mendadak, Mode Gabungan menunjukkan ketangguhan (*dynamic stiffness*) yang tangguh dengan waktu pemulihan sangat singkat (0,00–0,30 detik) serta mampu menjaga kompensasi arus tetap berada di bawah ambang batas aman.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis hasil pengujian serta batasan masalah yang ditemukan selama penelitian ini berlangsung, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan dan penyempurnaan pada penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Implementasi Sistem *Hybrid* (Sensored-Sensorless)

Mengingat algoritma *sensorless* murni memiliki batas kegagalan pada kecepatan di bawah 310 RPM, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan topologi *hybrid*. *Sensor Hall* dapat difungsikan khusus pada saat awalan (*start-up*) atau kecepatan merayap, kemudian sistem beralih ke mode *sensorless* secara halus (*seamless transition*) saat mencapai putaran menengah hingga tinggi.

2. Penggunaan Algoritma Penalaan Adaptif

Untuk menentukan K_p dan K_i dapat digantikan dengan algoritma kendali cerdas, seperti *Fuzzy Logic Controller* atau *Artificial Neural Network*, agar parameter PI dapat beradaptasi secara otomatis (*auto-tuning*) terhadap fluktuasi kecepatan dan beban secara *real-time*.

3. Pengujian pada Sasis Kendaraan Aktual (*Dynamometer*)

Pengujian gangguan beban pada penelitian ini masih menggunakan generator DC statis. Untuk memvalidasi profil beban yang lebih nyata, motor sebaiknya diuji langsung pada sasis LEV di atas *chassis dynamometer* untuk memperhitungkan inersia mekanis riil, hambatan aerodinamis, dan hambatan gulir (*rolling resistance*) jalan raya.

4. Implementasi Mekanisme *Anti-Windup* pada Kontroler PI

Teridentifikasi bahwa *overshoot* transien signifikan pada Kontrol Mode Gabungan (mencapai 13,28% pada 500 RPM) disebabkan oleh efek *integral windup* akibat pembatasan arus oleh *inner loop* selama fase akselerasi. Penelitian selanjutnya disarankan mengimplementasikan mekanisme *anti-windup* (seperti *clamping* atau *back-calculation*) pada kontroler PI kecepatan, guna menekan akumulasi error integral berlebih selama kondisi saturasi arus, sehingga *overshoot* dapat direduksi tanpa mengorbankan kecepatan respons sistem.

