

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan analisis yang telah dilakukan terhadap sistem pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan metode V/F tanpa kendali dan DTC-HBPWM pada konfigurasi *single inverter* dan *dual inverter* dengan variasi beban 0 hingga 26,71 Nm (beban nominal), maka diperoleh kesimpulan yang menjawab rumusan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Sistem *Direct Torque Control* (DTC) berhasil dirancang untuk mengendalikan torsi elektromagnetik dan fluks stator motor induksi tiga fasa secara langsung melalui pemilihan level tegangan optimal pada setiap siklus pensaklaran tanpa transformasi koordinat yang kompleks. Estimasi fluks dan torsi dilakukan melalui integrator tegangan-arus pada kerangka referensi $\alpha - \beta$ **Persamaan (2.36)** dan perkalian silang komponen fluks-arus **Persamaan (2.29)**, sementara pemilihan level tegangan ditentukan oleh tabel pensaklaran berdasarkan status histeresis torsi dan fluks **Persamaan (2.31–2.33)**. Kontroler PI pada *loop* kecepatan menghasilkan referensi torsi secara dinamis sehingga *steady-state error* kecepatan dapat ditekan hingga 173 kali lebih kecil dibandingkan V/F pada rentang beban operasional normal (0–25 Nm), membuktikan efektivitas perancangan DTC dalam mencapai tujuan pengendalian torsi dan fluks secara langsung.
2. HBPWM berhasil diimplementasikan sebagai teknik pensaklaran pada konfigurasi *single inverter* maupun *dual inverter* dengan pita histeresis sebesar $\pm 0,25$ A. Pada *dual inverter*, mekanisme ini menghasilkan resolusi koreksi arus yang lebih tinggi karena tegangan fasa stator merupakan selisih keluaran dua inverter sesuai **Persamaan (2.26)**. Penerapan HBPWM terbukti menekan *ripple* arus secara terkontrol, meningkat hanya 151,7–160,0% dari beban 0 ke 25 Nm, dibandingkan V/F yang meningkat hingga 311,3% pada rentang beban yang sama, menunjukkan bahwa mekanisme

umpan balik arus kontinu pada HBPWM jauh lebih efektif menstabilkan kualitas arus dibandingkan modulasi sinusoidal tanpa umpan balik.

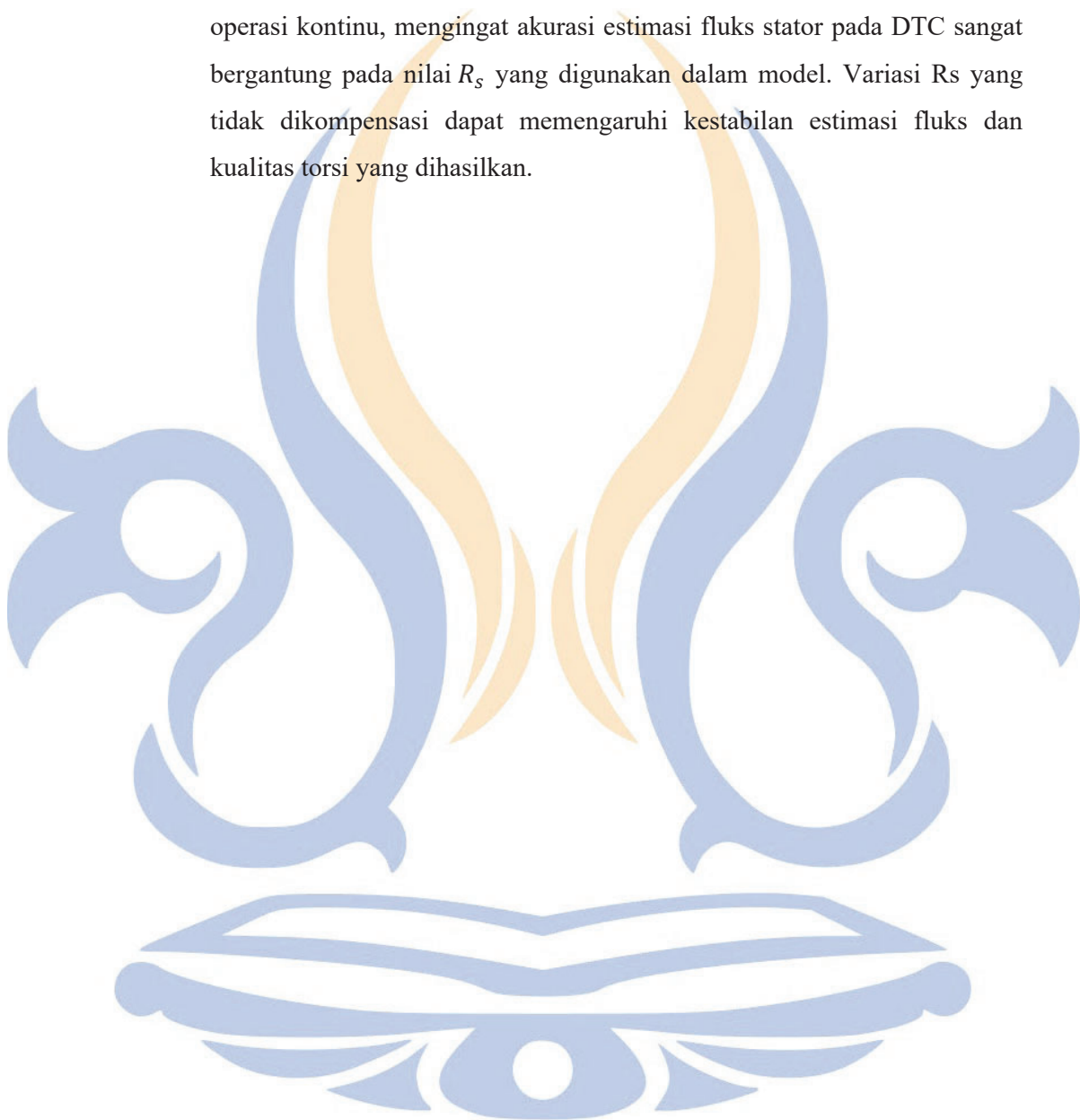
3. Pada rentang beban 0–25 Nm, *dual inverter* DTC-HBPWM menunjukkan performa terbaik dengan T_{pp} 0,305–0,357 Nm (lebih rendah 51,4–57,0% dari *single inverter* DTC-HBPWM dan hingga 95,07% dari V/F *single inverter*) serta torsi minimum selalu positif, sehingga tidak terjadi pembalikan torsi. Fluktuasi daya mekaniknya juga jauh lebih stabil, turun hingga 96,0% dibandingkan V/F. Sebaliknya, *dual inverter* tanpa kendali *closed-loop* (V/F) justru menghasilkan T_{pp} lebih besar dibandingkan *single inverter*, membuktikan bahwa keunggulan konfigurasi *dual inverter* hanya terealisasi bila dikombinasikan dengan kendali *closed-loop* seperti DTC-HBPWM. Pada beban nominal 26,71 Nm, kedua konfigurasi DTC-HBPWM mengalami *loss of control* (kecepatan rotor terbalik, SSE > 480%, fluks kolaps hingga 11,2% dari referensi) akibat *integrator windup* pada pengendali PI yang dipicu keterbatasan tegangan *DC-Link*. Metode V/F tetap stabil pada beban yang sama (meski SSE tinggi 18,886%) karena tidak memiliki mekanisme integrator yang dapat mengalami *windup*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran dikemukakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

1. Penelitian ini masih berbasis simulasi MATLAB/Simulink, sehingga perlu dilakukan implementasi pada perangkat keras untuk memvalidasi performa sistem DTC-HBPWM *dual inverter* pada kondisi *real-time* dengan beban mekanik yang sesungguhnya.
2. Penyetelan parameter kontroler PI dalam penelitian ini dilakukan dengan metode *trial and error* dan belum dilengkapi mekanisme *anti-windup*, sehingga pada beban mendekati atau melebihi torsi nominal (26,71 Nm) sistem mengalami *integrator windup* yang menyebabkan kegagalan kendali permanen. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan menambahkan mekanisme *anti-windup* (seperti *back-calculation* atau *clamping*) pada kontroler PI agar sistem tetap stabil ketika referensi torsi melampaui kapabilitas motor.

3. Perlu dilakukan analisis ketahanan sistem terhadap variasi parameter motor, khususnya perubahan resistansi stator (R_s) akibat kenaikan suhu pada operasi kontinu, mengingat akurasi estimasi fluks stator pada DTC sangat bergantung pada nilai R_s yang digunakan dalam model. Variasi R_s yang tidak dikompensasi dapat memengaruhi kestabilan estimasi fluks dan kualitas torsi yang dihasilkan.



INSTITUT TEKNOLOGI
KALIMANTAN