

STRATEGI KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI MENGGUNAKAN PWM INVERTER BERBASIS JARINGAN SARAF TIRUAN

Adi Kurniawan^{*)}, and Anisa Harumwidiah

Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Jl. Raya ITS Kampus Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

^{*)E-mail: adi.kurniawan@ne.its.ac.id, adi.k.046@gmail.com}

Jurusan Teknik Listrik Industri, Politeknik 17 Agustus 1945 Surabaya
Jl. Semolowaru 45, Surabaya, 60119, Indonesia

Abstrak

Pada penelitian ini, diusulkan sebuah metode untuk mengendalikan kecepatan motor induksi menggunakan PWM inverter tiga fasa yang dikendalikan oleh pengendali berbasis jaringan saraf tiruan. Sistem terdiri atas sebuah sumber tegangan DC, PWM inverter tiga fasa, pengendali berbasis jaringan saraf tiruan, filter pasif, dan motor induksi tiga fasa. Data pelatihan untuk pengendali berbasis jaringan saraf tiruan didapat dengan terlebih dahulu memasang pengendali PID untuk mengendalikan PWM inverter, kemudian mencari secara manual parameter PID yang terbaik untuk setiap kondisi kecepatan, lalu mengambil data masukan dan keluaran dari kontroler PID tersebut sebagai data pelatihan. Validasi dilakukan dengan melakukan simulasi pada perangkat lunak komputer. Sistem yang diusulkan diuji dengan dua metode, yaitu pengujian perubahan kecepatan referensi dan pengujian perubahan torsi beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kendali berbasis jaringan saraf tiruan mampu mengendalikan motor induksi sesuai kecepatan referensi yang diinginkan dengan ketepatan yang tinggi.

Kata kunci: motor induksi, jaringan saraf tiruan, PWM inverter, kendali kecepatan, propulsi elektrik

Abstract

In this research, a method to control the speed of induction motor using three-phase PWM inverter controlled by artificial neural network controller is proposed. The system consists of a DC voltage source, three-phase PWM inverter, artificial neural network-based controller, passive filter, and three-phase induction motor. The training data of the artificial neural network-based controller is obtained by installing PID controller to control the PWM inverter, then manually finding the optimum parameter of each speed condition, and pick the input and output of the PID controller as the data training. The validation is done through the computer software simulation. The proposed system is tested with two methods, which are the variation of speed reference and variation of load torque. The test results show that artificial neural network-based controller can regulate the speed of induction motor with high accuracy.

Keywords: induction motor, artificial neural network, PWM inverter, speed controller, electric propulsion

1. Pendahuluan

Motor induksi merupakan salah satu jenis motor listrik yang paling banyak digunakan dalam kehidupan manusia. Dalam penggunaan rumah tangga, motor induksi satu fasa antara lain digunakan pada pompa air, kipas angin, *air conditioner* dan sebagainya. Di dunia industri, motor industri tiga fasa berjenis rotor sangkar tupai banyak digunakan sebagai penggerak peralatan seperti conveyor, pompa besar, dan peralatan-peralatan lainnya. Belakangan ini, motor induksi tiga fasa juga banyak digunakan pada aplikasi kendaraan elektrik, baik untuk mobil listrik, maupun untuk propulsi pada kapal. Penggunaan motor

listrik induksi sebagai pengganti motor bakar tidak hanya menghemat penggunaan bahan bakar minyak yang semakin berkurang, namun juga membantu mengendalikan emisi gas buang di alam.

Motor induksi tiga fasa jenis rotor sangkar sangat disukai karena memiliki kelebihan berupa ukuran yang relatif kecil, konstruksi sederhana namun kokoh, harga relatif murah, perawatan yang mudah, dan memiliki keandalan tinggi [1]-[4]. Meski memiliki sejumlah kelebihan, motor induksi juga memiliki kelemahan. Dibandingkan dengan motor DC, pengendalian kecepatan pada motor induksi lebih sulit karena banyak nilai parameter yang bersifat tidak linier [5].

Pengendalian kecepatan motor induksi sangat penting untuk dua jenis sistem. Sistem yang pertama adalah sistem yang memerlukan kecepatan bervariasi. Contoh sistem ini adalah kapal dengan penggerak berupa motor listrik. Ketika berada di daerah pelabuhan, kapal bergerak dengan kecepatan rendah. Ketika telah berada di perairan lepas, kapal dapat melaju dengan kecepatan maksimum. Sistem kedua yang memerlukan pengendalian kecepatan motor induksi adalah sistem yang harus berputar dengan kecepatan konstan walaupun terjadi perubahan beban. Pada motor induksi yang tidak dikendalikan, kecepatan motor akan berubah ketika beban yang diberikan berubah. Contoh sistem yang memerlukan kecepatan motor konstan adalah pompa sentrifugal pada industri gula, dimana beban ditambahkan secara bertahap sedangkan putaran pompa harus tetap konstan^[1].

Perkembangan teknologi elektronika daya membuat pengaturan kecepatan motor induksi menjadi memungkinkan. Konverter listrik berbasis komponen elektronika dapat memvariasikan amplitudo maupun frekuensi dari tegangan yang masuk ke motor. Dengan mengatur tegangan yang masuk ke motor, kecepatan motor induksi dapat dikendalikan. Teknik yang umum digunakan untuk pengaturan kecepatan motor induksi adalah dengan menggunakan inverter tiga fasa yang disuplai oleh sumber tegangan DC.

Ketepatan dari pengaturan kecepatan motor induksi bergantung pada metode pengendalian yang digunakan. Berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan performa pengendalian motor tersebut. Referensi^[6] menunjukkan metode pengendalian lingkaran terbuka dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengendalikan tegangan inverter. Referensi^[7] membandingkan metode PWM dan metode lingkaran tertutup menggunakan pengendali proporsional integral (PI) dengan koefisien tetap. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa metode lingkaran tertutup dengan pengendali PI mampu memberikan hasil pengendalian yang lebih akurat. Permasalahan yang timbul bila koefisien pengendali PI tetap adalah pengendali hanya bekerja secara optimal pada selang kecepatan tertentu. Metode penalaan koefisien pengendali proporsional integral derivatif (PID) secara otomatis yang diusulkan di^[8] dapat memperluas selang kecepatan yang dapat dikendalikan secara akurat. Pada^{[1], [2], [9], [10]}, digunakan pengendali berbasis jaringan saraf tiruan. Pada keempat referensi tersebut, jaringan saraf tiruan digunakan untuk mengidentifikasi parameter sistem yang belum diketahui, kemudian parameter tersebut digunakan untuk menghasilkan sinyal kendali dari pengendali PID. Referensi^[4] menggunakan metode yang serupa, namun parameter sistem diidentifikasi dengan menggunakan pengendali logika fuzzy.

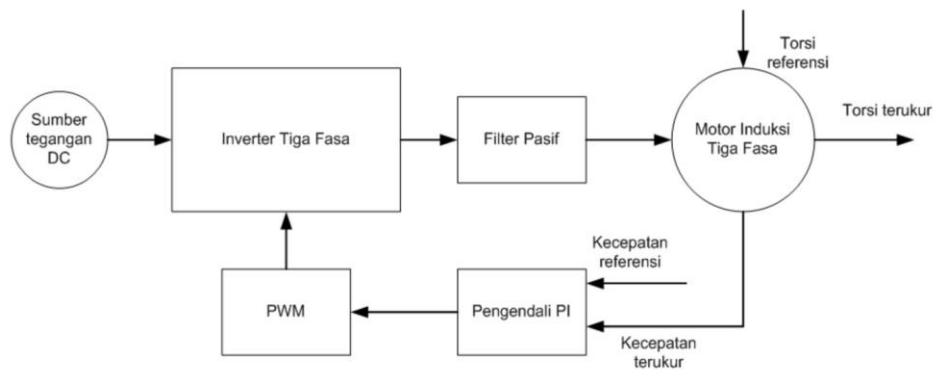
Pada penelitian ini, diusulkan metode yang berbeda untuk mengendalikan kecepatan motor induksi tiga fasa. Metode pengendalian yang digunakan berbasis jaringan saraf tiruan. Berbeda dengan^{[1], [2], [9], [10]}, pada penelitian ini sistem kendali yang digunakan lebih sederhana karena jaringan saraf tiruan digunakan untuk menggantikan fungsi pengendali PI. Jaringan saraf tiruan menghasilkan sinyal kendali yang selanjutnya diolah oleh PWM untuk mengendalikan tegangan inverter. Validasi dari metode pengendalian yang diusulkan dilakukan dengan simulasi menggunakan piranti lunak simulink. Pengujian dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi pengendalian untuk kecepatan yang bervariasi maupun untuk kecepatan yang konstan ketika beban bervariasi. Metode pengendalian yang diusulkan dijabarkan pada seksi 2, sedangkan hasil simulasi dan pembahasan ditunjukkan pada seksi 3. Kesimpulan dari hasil pekerjaan yang diambil berdasarkan hasil simulasi dituliskan pada seksi 4.

2. Metode

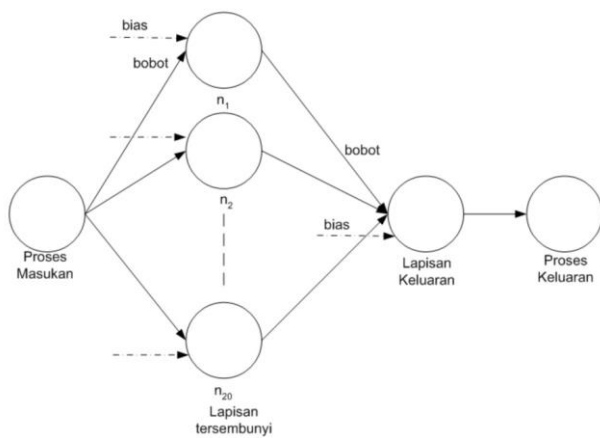
2.1. Pencarian Data Pelatihan untuk Jaringan Saraf Tiruan

Sebelum pengendali berbasis jaringan saraf tiruan dapat dibuat, data pelatihan harus diperoleh terlebih dahulu. Data pelatihan yang digunakan adalah sinyal galat sebagai masukan dan sinyal kendali sebagai keluaran. Agar pengendali yang disusun mampu mengendalikan kecepatan motor dengan tingkat ketepatan yang tinggi, maka data pelatihan yang digunakan juga harus data yang baik.

Metode yang dilakukan untuk mendapatkan data pelatihan adalah dengan menyusun sistem menggunakan kendali PI terlebih dahulu seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem terdiri atas sebuah sumber tegangan DC 600 V sebagai penyuplai tegangan, sebuah inverter untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa, filter pasif yang berfungsi untuk memperhalus tegangan AC yang dihasilkan inverter, serta sebuah motor induksi sangkar tupai tiga fasa dengan daya nominal 4 kW dan kecepatan sinkron 1500 rpm. Tegangan nominal antar fasa dari motor adalah 400 V dengan frekuensi 50 Hz. Parameter lengkap dari motor induksi ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 1. Diagram Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi dengan Pengendali PI



Gambar 2. Diagram Pengendali Berbasis Jaringan Saraf Tiruan

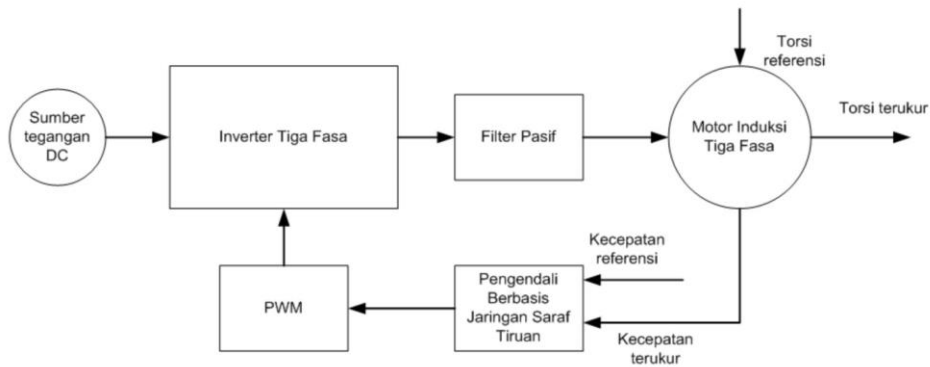
Inverter dikendalikan oleh rangkaian kendali yang tersusun atas pengendali PI dan sinusoidal PWM (SPWM). Pengendali PI mendapat masukan berupa sinyal galat yang diperoleh dari perbandingan antara kecepatan referensi yang diinginkan dengan kecepatan sesungguhnya yang terukur dari motor induksi. Keluaran dari pengendali PI adalah sinyal kendali yang selanjutnya diumpungkan pada SPWM. Tugas SPWM adalah menghasilkan sinyal kendali dengan frekuensi tertentu berdasarkan sinyal kendali yang dihasilkan oleh pengendali PI. Sinyal yang dihasilkan oleh PWM kemudian digunakan untuk mengendalikan penyalakan saklar pada inverter tiga fasa yang tersusun atas *insulated gate bipolar transistor* (IGBT).

Setelah rangkaian selesai disusun, simulasi dilakukan pada simulink untuk mendapatkan parameter pengendali PI yang mampu menghasilkan kecepatan yang paling akurat untuk kecepatan referensi antara 120 hingga 150 rad/detik. Setelah didapatkan parameter pengendali PI terbaik untuk setiap kondisi kecepatan, maka data masukan dan keluaran pengendali PI berupa sinyal galat dan sinyal kendali disimpan untuk selanjutnya digunakan sebagai data pelatihan.

2.2. Pembuatan Pengendali Berbasis Jaringan Saraf Tiruan

Data pelatihan yang diperoleh dari pengendali PI selanjutnya diolah untuk menyusun pengendali berbasis jaringan saraf tiruan. Metode pelatihan yang digunakan pada penelitian ini adalah algoritma jaringan saraf tiruan *backpropagation* dari Levenberg-Marquardt. Algoritma ini dipilih karena pencarian nilai bobot dan bias antara tiap titik pada jaringan dilakukan sebanyak dua tahap, yaitu tahap langkah maju dari masukan ke keluaran, lalu tahap langkah mundur dari keluaran ke masukan. Dengan demikian, nilai bobot dan bias antar titik yang diperoleh akan lebih akurat dibanding algoritma jaringan saraf tiruan yang hanya melakukan pelatihan dengan propagasi langkah maju.

Algoritma jaringan saraf tiruan *backpropagation* terdiri atas masukan, lapisan tersembunyi, lapisan keluaran, serta target keluaran seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pada saat pelatihan, data sinyal galat digunakan sebagai masukan, sedangkan data sinyal kendali digunakan sebagai data keluaran. Dengan melakukan pelatihan, akan didapat nilai bobot terbaik beserta nilai bias untuk setiap hubungan antara tiap lapisan. Jumlah titik pada lapisan tersembunyi dipilih sebanyak 20 buah, sedangkan data masukan dan keluaran yang digunakan sebanyak 7123 buah. Dari 7123 buah data tersebut, hanya 70% yang benar-benar digunakan untuk pelatihan sebagai penentu bobot dan bias setiap hubungan pada jaringan. Data yang lain sebesar 15% digunakan untuk mengukur tingkat keakuratan dari jaringan yang terbentuk, serta 15% sisanya digunakan untuk pengujian jaringan sebelum dan setelah pelatihan.



Gambar 3. Diagram Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi dengan Pengendali Berbasis Jaringan Saraf Tiruan

Setelah pelatihan selesai dilakukan, maka akan terbentuk sebuah pengendali berbasis jaringan saraf tiruan, dimana bobot dan bias antar tiap titik pada lapisan bernilai tetap berdasarkan dari hasil pelatihan. Dengan demikian, maka pengendali ini dapat memperkirakan nilai keluaran paling akurat berdasarkan nilai masukan yang diberikan. Dalam hal ini, pengendali berbasis jaringan saraf tiruan berfungsi untuk memperkirakan nilai sinyal kendali yang terbaik berdasarkan masukan berupa sinyal galat.

2.3. Penyusunan Model Sistem

Sistem yang diusulkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. Rangkaian dari sistem ini hampir seluruhnya sama dengan rangkaian pada Gambar 1, hanya pengendali berbasis jaringan saraf tiruan digunakan sebagai pengganti pengendali PI. Seluruh nilai parameter untuk komponen yang lain sama persis dengan sistem yang menggunakan pengendali PI.

Pengendali berbasis jaringan saraf tiruan yang digunakan adalah hasil dari pelatihan yang dilakukan pada sub-seksi 2.2. Selanjutnya, dilakukan simulasi pada rangkaian ini untuk menguji kemampuan pengendali berbasis jaringan saraf tiruan untuk mengendalikan kecepatan dari motor induksi tiga fasa berdasarkan kecepatan referensi yang diberikan. Terdapat dua jenis simulasi yang dilakukan untuk menguji sistem, yaitu simulasi dengan kecepatan referensi yang berubah-ubah, serta simulasi dengan kecepatan referensi tetap, namun torsi beban yang diberikan berubah-ubah.

Tabel 1. Parameter Rating Motor Induksi Tiga Fasa

Jenis Parameter	Nilai
Daya	4 kW
Tegangan masukan	400 V
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan	1430 rpm
Resistansi Stator	1,405 ohm
Induktansi Stator	0,0058 H
Resistansi Rotor	1,395 ohm
Induktansi Rotor	0,0058 H
Induktansi Bersama	0,1722 H
Inersia	0,0131 J/kg.m ²
Jumlah Kutub	2

3. Hasil dan Analisa

Pada penelitian ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak simulink. Sistem yang diusulkan pada Gambar 3 dimodelkan terlebih dahulu pada simulink, kemudian dilakukan simulasi untuk menguji ketepatan dari pengendali berbasis jaringan saraf tiruan yang diusulkan. Pada seluruh simulasi, nilai sumber tegangan DC yang digunakan adalah tetap, yaitu sebesar 600 V. Nilai tegangan DC ini dipilih agar motor induksi mendapat masukan tegangan AC sesuai ratingnya, yaitu 400 V. Pemilihan nilai tegangan DC berdasarkan rumus hubungan antara tegangan DC dan AC sebagai masukan dan keluaran dari inverter tiga fasa sebagai berikut:

$$V_{AC} = m \frac{\sqrt{3}}{2} V_{DC} \tag{1}$$

atau

$$V_{DC} = \frac{2m}{\sqrt{3}} V_{AC} \tag{2}$$

Dengan nilai $V_{AC} = 400$, dan $0 < m < 1$, maka nilai V_{DC} dapat dihitung

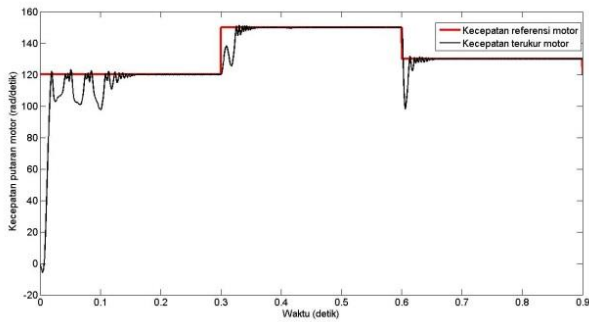
$$V_{DC} > \frac{2}{\sqrt{3}} .400$$

$$V_{DC} > 462V$$

Untuk mengantisipasi terjadinya drop tegangan pada inverter, maka digunakan suplai tegangan DC dengan nilai 600 V, serta digunakan sistem kontrol tegangan keluaran inverter agar nilai tegangan yang masuk ke motor induksi selalu stabil pada angka 400 V.

3.1. Simulasi Dengan Kecepatan Referensi Bervariasi

Pada sub-seksi ini, dilakukan simulasi dengan mengubah kecepatan referensi motor induksi saat motor sedang berputar. Pengujian ini penting karena pada beberapa



Gambar 4. Hasil Simulasi Kecepatan Motor Induksi dengan Kecepatan Referensi Bervariasi

sistem seperti kapal dengan propulsi elektrik, kecepatan motor harus dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan.

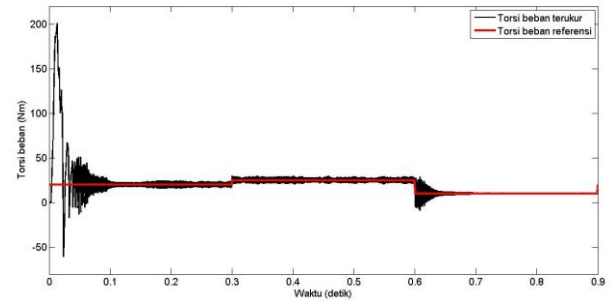
Pada saat awal simulasi, kecepatan referensi yang diberikan adalah sebesar 120 rad/detik. Selanjutnya, kecepatan referensi dinaikkan menjadi 150 rad/detik setelah mencapai detik 0,3. Setelah diuji dengan kenaikan kecepatan referensi, pengendali diuji dengan penurunan kecepatan referensi. Pada detik 0,6, kecepatan referensi diturunkan sebesar 20 rad/detik menjadi 130 rad/detik. Pemberian nilai kecepatan referensi ini adalah berdasarkan kecepatan rating motor induksi yaitu sebesar 1430 rpm atau 150 rad/detik. Torsi beban yang diberikan pada simulasi ini adalah konstan, yaitu sebesar 20 Nm. Dengan demikian, daya keluaran tertinggi yang terjadi adalah 3000 W pada kecepatan 150 rad/detik. Nilai ini masih di bawah daya rating motor sebesar 4000 W.

Hasil dari simulasi yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 4. Garis berwarna biru merupakan besaran dari nilai referensi kecepatan yang diberikan pada pengendali, sedangkan kurva berwarna merah merupakan kecepatan sesungguhnya dari motor induksi yang terukur. Berdasarkan gambar tersebut, dapat diamati bahwa kecepatan yang terukur dari motor mampu mengikuti kecepatan referensi yang diberikan, dengan tingkat ketepatan yang tinggi.

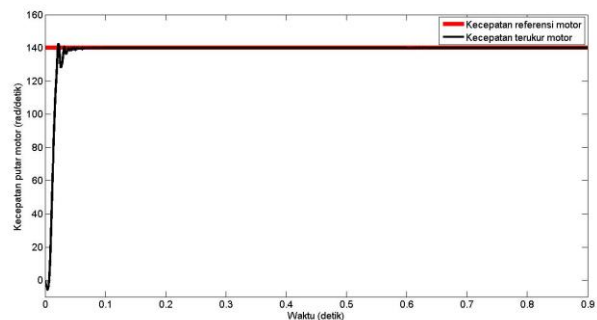
Hasil simulasi tersebut dapat diperjelas dengan pembacaan kecepatan yang terukur pada tachometer. Dari hasil pembacaan, didapat bahwa kecepatan yang terukur selalu bernilai tepat sama dengan kecepatan referensi baik pada kecepatan referensi 120 rad/detik, 150 rad/detik, maupun 130 rad/detik. Hasil ini membuktikan bahwa pengendali berbasis jaringan saraf tiruan dapat mengendalikan kecepatan motor induksi dengan tingkat ketepatan mencapai 100% untuk kecepatan antara 120 – 150 rad/detik.

3.2. Simulasi Dengan Kecepatan Referensi Konstan dan Torsi Beban Bervariasi

Pada sub-seksi ini dilakukan simulasi dengan memberikan kecepatan referensi yang konstan pada motor, yaitu sebesar 140 rad/detik, sedangkan torsi beban divariasikan.



a



b

Gambar 5. Hasil Simulasi Motor Induksi dengan Kecepatan Referensi Konstan dan Torsi Beban Bervariasi (a) Torsi (b) Kecepatan

Pada kondisi awal, torsi beban diberikan sebesar 20 Nm. Pada detik 0,3, torsi beban dinaikkan menjadi 25 Nm. Selanjutnya torsi beban diturunkan menjadi 10 Nm pada detik 0,6. Pemberian torsi beban maksimal 25 Nm adalah berdasarkan pertimbangan daya rating motor. Pada kondisi torsi beban 25 Nm dan kecepatan 140 rad/detik, maka daya keluaran motor adalah 3500 W.

Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5(a), diperlihatkan grafik perbandingan antara nilai torsi referensi yang diberikan terhadap nilai torsi yang terukur. Nilai torsi referensi ditunjukkan oleh garis berwarna biru, sedangkan nilai torsi yang terukur ditunjukkan oleh garis berwarna merah. Dari grafik tersebut, dapat diamati bahwa nilai torsi yang terukur dapat mengikuti torsi referensi yang diberikan, meskipun terdapat fluktuasi nilai yang relatif kecil. Pada Gambar 5(b), ditunjukkan perbandingan nilai kecepatan referensi motor dan kecepatan yang terukur dari motor. Kecepatan referensi motor yang ditunjukkan oleh garis berwarna biru dibuat bernilai konstan, yaitu 140 rad/detik. Hasil kecepatan motor yang terukur ditunjukkan oleh garis berwarna merah. Hasil pengamatan dari grafik tersebut maupun pembacaan pada tachometer menunjukkan bahwa

kecepatan motor dapat bernilai selalu konstan sebesar 140 rad/detik walaupun terjadi perubahan torsi beban. Pada saat perubahan beban terjadi, kecepatan motor hanya beresilasi dengan nilai yang sangat kecil dan waktu yang sangat singkat, kemudian kembali stabil pada nilai 140 rad/detik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengendali berbasis jaringan saraf tiruan memiliki tingkat ketepatan yang baik dalam mengatur putaran motor agar tetap konstan walaupun terjadi perubahan beban.

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada seksi sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa pengendali berbasis jaringan saraf tiruan yang diusulkan dapat mengendalikan kecepatan motor dengan tingkat ketepatan yang tinggi. Pada simulasi dengan kecepatan referensi bervariasi, nilai kecepatan motor yang terukur selalu sesuai dengan nilai kecepatan referensi motor yang diberikan. Pada simulasi dengan kecepatan referensi konstan dan torsi beban bervariasi, terbukti bahwa pengendali dapat mengendalikan kecepatan motor pada kecepatan yang konstan walaupun torsi beban berubah. Nilai bobot dan bias dari JST yang digunakan adalah sama untuk setiap mode. Nilai bobot dan bias dari JST didapat dari pelatihan dengan data sinyal galat kontroler PI sebagai masukan, sedangkan data sinyal kendali kontroler PI sebagai data keluaran. Meski demikian, penelitian ini masih berupa simulasi. Agar penelitian ini dapat lebih bermanfaat, perlu dibuat implementasi dari pengendali berbasis jaringan saraf tiruan untuk meningkatkan performa sistem yang menggunakan motor induksi tiga fasa, baik di industri, kendaraan listrik, maupun aplikasi yang lain.

Referensi

- [1]. R. I. Putri, M. Fauziyah, and A. Setiawan, "Penerapan Kontroler Neural Fuzzy Untuk Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa," *J. INKOM*, vol. III, no. 1-2, pp. 53-65, 2009.
- [2]. B. Amarapur, "Neural Network Based Speed Control of Induction Motor," in *2013 Nirma University International Conference on Engineering*, 2013, pp. 1-6.
- [3]. Z. Boulghasoul, L. El Bahir, A. Elbacha, and E. Elwarraki, "Adaptive-Predictive Controller based on Continuous-Time Poisson- Laguerre Models for Induction Motor Speed Control Improvement," *J. Electr. Enginereeing Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 908-925, 2014.
- [4]. J. A. Sneha, K. Kumar, V. B. J. Victor, and J. A. Glenn, "Takagi-Sugeno Fuzzy Logic Speed Control of An Indirect Field Oriented Control Induction Motor Drive Using Genetic Algorithm," *Intrenational J. Innov. Res. Eng. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 74-82, 2014.
- [5]. C. Chen, "Sliding Mode Controller Design of Induction Motor Based on Space-Vector Pulsewidth Modulation Method," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 5, no. 10, p. 4198, 2009.
- [6]. J. J. Patel, A. M. Kuvabat, and M. B. Jhala, "Speed Control of a Three Phase Induction Motor Using PWM Inverter," *Int. J. Eng. Dev. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 503-507, 2014.
- [7]. R. Singh, S. K. Bajpai, and H. S. Sandhu, "Comparative Study of PWM Control and PI Control of Induction Motor," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 4, no. 1, pp. 53-58, 2015.
- [8]. G. Sharma, T. Reecha, S. Kholiya, and J. Mongia, "Analysis of VLSI Based Induction Motor Speed Control using Auto Tune PID Controller," *Int. J. Enhanc. Res. Sci. Technol. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 230-233, 2014.
- [9]. C. Chen, "Neural Network Control of Induction Motor Speed Control System," *Int. J. Control Autom.*, vol. 7, no. 10, pp. 243-254, 2014.
- [10]. K. Peng and J. Zhao, "Speed control of induction motor using neural network sliding mode controller," in *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 2011, pp. 6125-6129.