

# Perbandingan Dua *Observer* Kecepatan Motor Arus Searah pada Sistem Kendali tanpa Sensor Kecepatan

Bernadeta Wuri Harini<sup>1</sup>, Martanto<sup>2</sup>, Tjendro<sup>3</sup>

**Intisari**—Dalam sistem kendali kecepatan motor tanpa sensor kecepatan, kecepatan motor tidak diukur secara langsung menggunakan sensor kecepatan, tetapi diperkirakan menggunakan sebuah *observer*. Sebagian besar sistem kendali tanpa sensor kecepatan diterapkan pada motor arus bolak-balik (*alternating current*, AC). Sistem ini belum banyak diterapkan pada motor arus searah (*direct current*, DC), padahal motor DC banyak digunakan sebagai penggerak dalam sistem kendali. Oleh karena itu, dalam makalah ini disajikan *observer* yang sederhana untuk memperkirakan kecepatan motor DC. *Observer* yang digunakan ini berdasarkan persamaan kelistrikan motor DC. Ada dua metode yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *observer* yang memperkirakan kecepatan berdasarkan nilai resistansi dan induktansi (metode L-R) dan *observer* yang memperkirakan kecepatan motor hanya berdasarkan nilai resistansi motor (metode R). Kecepatan diperkirakan berdasarkan nilai arus dan tegangan jangkar ( $i_a$  dan  $v_a$ ). Oleh karena itu, untuk mengukur arus dan tegangan jangkar, digunakan sebuah sensor arus dan tegangan. Pada penelitian ini, *observer* tidak hanya dihitung tetapi juga diimplementasikan pada motor DC yang sebenarnya. Sebuah mikrokontroler Arduino digunakan untuk menghitung kecepatan motor DC. Pada penelitian ini, digunakan sebuah LN298 sebagai penggerak motor DC. *Observer* metode R lebih sederhana daripada metode L-R. Dari hasil pengujian, diketahui bahwa estimasi kecepatan *observer* metode R kurang tepat dibandingkan dengan metode L-R. Dengan perhitungan manual, hasil estimasi kecepatan motor pada metode L-R memiliki galat sebesar 0,14%, sedangkan hasil estimasi kecepatan motor pada metode R memiliki galat sebesar 5,03%. Hasil estimasi kecepatan motor yang diimplementasikan pada motor DC yang sebenarnya dan sistem mikrokontroler dengan menggunakan metode L-R memiliki galat sebesar 3,98%, sedangkan hasil estimasi kecepatan motor pada metode R memiliki galat sebesar 4,87%.

**Kata Kunci**—Motor Arus Searah, Induktansi, Resistansi, *Observer*, Kendali tanpa Sensor Kecepatan.

## I. PENDAHULUAN

Secara umum, ada dua metode untuk mengendalikan kecepatan motor, yaitu sistem kendali berbasis sensor dan sistem kendali tanpa sensor kecepatan. Kelemahan dari sistem kendali berbasis sensor dibandingkan dengan sistem kendali tanpa sensor kecepatan adalah kendala dalam pemasangan sensor kecepatan pada rotor, yaitu sulit mendapatkan posisi tengah dalam pemasangan sensor. Oleh karena itu, dikembangkan sistem kendali tanpa sensor kecepatan untuk

mengatasi kelemahan tersebut [1]. Dalam sistem ini, nilai sebenarnya dari sistem (variabel terkendali) tidak diukur secara langsung menggunakan sensor, tetapi diperkirakan dari arus stator dan/atau tegangan stator menggunakan *observer*.

Sistem kendali tanpa sensor kecepatan sebagian besar diterapkan pada motor AC [2]-[6]. Sistem ini belum banyak diterapkan pada motor DC, walaupun motor DC banyak digunakan dalam bidang kendali, misalnya untuk robot [7], sepeda listrik [8], dan penggerak pada sistem pelacak sinar matahari [9]-[10]. Oleh karena itu, sistem kendali tanpa sensor kecepatan pada motor DC masih terus diteliti untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Penelitian tentang sistem kendali tanpa sensor kecepatan pada motor DC telah dilakukan sebelumnya [11]-[14].

Salah satu bagian penting dari sistem kendali tanpa sensor kecepatan adalah *observer*. Sistem harus dapat mengestimasi variabel-variabel yang dikendalikan dengan baik, sehingga nilai estimasi yang diperoleh sesuai dengan nilai yang sebenarnya. Ada beberapa jenis *observer* yang digunakan untuk memperkirakan kecepatan motor. Beberapa di antaranya adalah *model reference adaptive system* (MRAS) [15], Luenberger [16], *extended Kalman filter* (EKF) [17]-[19], dan *sliding mode observer* (SMO) [20], [21]. Ada beberapa penelitian yang menggunakan kombinasi dari beberapa *observer*, misalnya kombinasi *fuzzy* dan SMO [22] serta kombinasi EKF dan SMO [18], [23].

Beberapa peneliti yang mempelajari sistem kendali motor DC tanpa sensor kecepatan menggunakan metode *observer* dan pengendali yang berbeda-beda. Referensi [19] menggunakan *observer* EKF. Dalam penelitian ini, pengendali yang digunakan untuk mengendalikan motor adalah pengendali logika *fuzzy* Takagi-Sugeno-Kang. Pada penelitian lain, digunakan *observer* Luenberger orde tereduksi [11]. Pengendali yang digunakan adalah pengendali berbasis *programmable logic controller* (PLC). Referensi [12] menggunakan *observer* Luenberger dengan pengendali menggunakan metode *sliding mode controller* (SMC). *Observer* lain, seperti *observer* vektor umpan balik juga telah disimulasikan [13]. Metode yang digunakan dalam penelitian-penelitian tersebut membutuhkan perhitungan yang kompleks. Selain itu, keempat penelitian pada artikel di atas belum diimplementasikan pada motor yang sebenarnya. Pada penelitian lain, estimasi kecepatan ditentukan oleh komponen riak arus motor [14]. Jumlah komponen riak per putaran adalah konstan, sehingga kecepatan rotor dapat diperkirakan dari komponen riak ini. Dalam metode ini, sistem harus dapat mendeteksi riak. Jika riak tidak terdeteksi, akan terjadi kesalahan.

Dalam penelitian ini, diinvestigasi penggunaan *observer* yang sederhana dan mudah diterapkan untuk memperkirakan

<sup>1,2,3</sup> Departemen Teknik Elektro Universitas Sanata Dharma, Jl. Paingan, Krodan, Maguwoharjo, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281 (phone: 0274-883037; fax: 0274-886529; email: <sup>1</sup>wuribernard@usd.ac.id, <sup>2</sup>martanto@usd.ac.id, <sup>3</sup>tjendro@usd.ac.id)

[Diterima: 7 Juli 2022, Revisi: 1 Agustus 2022]

kecepatan motor DC. *Observer* yang digunakan berdasarkan persamaan kelistrikan motor DC. Metode *observer* menggunakan persamaan motor listrik juga diusulkan untuk memperkirakan kecepatan PMSM [24]. Dalam makalah ini, persamaan motor listrik digunakan untuk mencari kecepatan sebenarnya dari PMSM karena kegagalan dalam mengestimasi kecepatan oleh *observer* MRAS. Pada kondisi ini, *observer* MRAS tidak dapat memperkirakan kecepatan motor yang sebenarnya karena motor diberi beban lebih.

Seperti metode kendali tanpa sensor kecepatan lainnya yang membutuhkan nilai parameter motor [25]-[27], kecepatan yang diperkirakan oleh *observer* yang diinvestigasi dalam penelitian ini juga dipengaruhi oleh nilai parameter motor DC. Dalam makalah ini, digunakan dua metode. Pada metode pertama, *observer* memperkirakan kecepatan motor DC berdasarkan nilai resistansi dan induktansi, sedangkan pada metode kedua, *observer* memperkirakan kecepatan motor hanya berdasarkan nilai resistansi motor. Oleh karena itu, metode pertama disebut sebagai metode L-R, dan metode kedua disebut metode R.

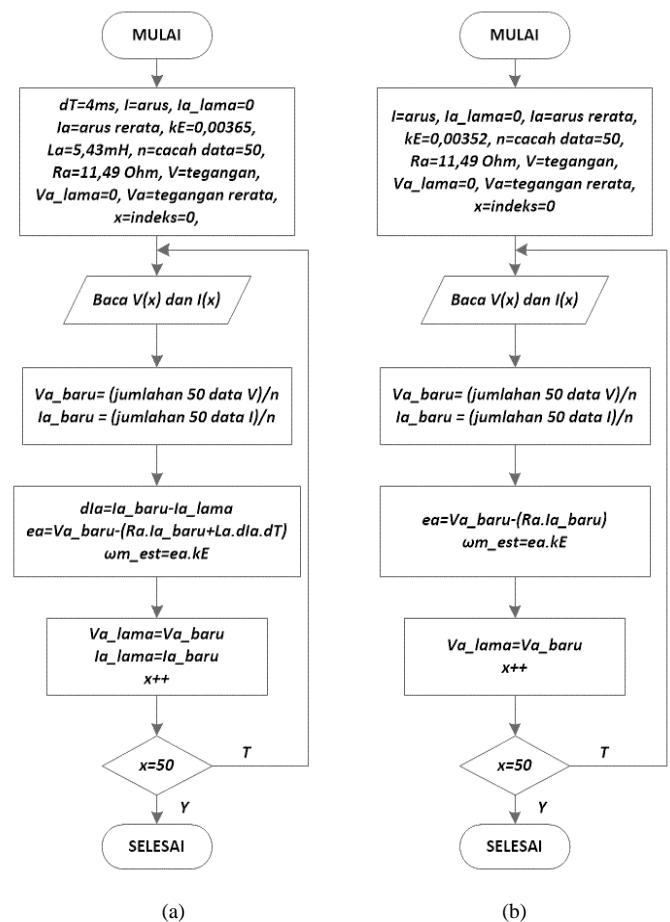
## II. METODOLOGI

Sistem kendali tanpa sensor kecepatan pada penelitian ini digunakan untuk mengendalikan satu buah motor DC. Motor DC yang digunakan mempunyai tegangan 24 V, arus beban penuh 2 A, dan kecepatan 6.000 rpm. Seperti yang telah dijelaskan dalam pendahuluan, sistem kendali tanpa sensor membutuhkan nilai parameter motor. Parameter motor DC yang dibutuhkan adalah tahanan jangkar ( $R_a$ ) dan induktansi jangkar ( $L_a$ ). Kedua parameter ini diukur menggunakan LCR meter.

Prosedur penelitian dijelaskan sebagai berikut. Pertama,  $R_a$  dan  $L_a$  motor DC diukur menggunakan LCR meter.  $R_a$  dan  $L_a$  diukur pada beberapa posisi. Kemudian, hasil dari beberapa pengukuran dihitung untuk mendapatkan nilai rata-rata. Nilai rata-rata ini digunakan untuk perhitungan selanjutnya. Kedua, nilai konstanta ggl balik ( $k_E$ ) dihitung dengan dua metode. Metode ini menggunakan persamaan berdasarkan rangkaian motor DC yang akan dijelaskan kemudian. Dari beberapa perhitungan  $k_E$ , kemudian dicari nilai rata-ratanya. Nilai  $k_E$  rata-rata ini digunakan untuk menghitung kecepatan estimasi. Setelah mendapatkan nilai  $k_E$ , kecepatan estimasi dihitung menggunakan dua metode yang akan dijelaskan kemudian. Perhitungan estimasi kecepatan kemudian diimplementasikan pada motor DC yang sebenarnya. Sistem mikrokontroler digunakan untuk menghitung estimasi kecepatan. Kedua hasil metode tersebut kemudian dianalisis dan dibandingkan untuk mendapatkan metode *observer* kecepatan motor DC yang terbaik.

Diagram alir kedua metode ditunjukkan pada Gbr. 1. *Observer* motor DC metode L-R ditunjukkan pada Gbr. 1(a), sedangkan *observer* motor DC metode R diperlihatkan pada Gbr. 1(b).

Arus dan tegangan jangkar yang diukur langsung dengan menggunakan sensor arus dan tegangan memiliki permasalahan, yaitu, adanya derau. Untuk menghilangkan derau tersebut, arus dan tegangan yang diukur menggunakan sensor arus dan tegangan dirata-rata menggunakan metode rata-rata bergerak (*moving average*), seperti terlihat pada diagram

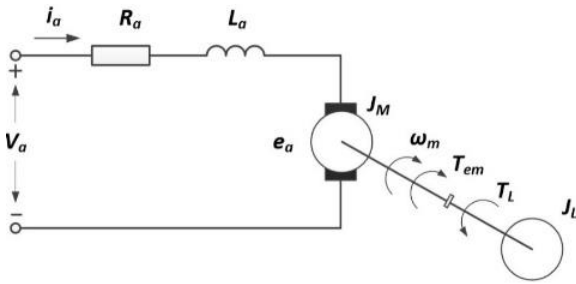


Gbr. 1 Metode *observer* motor DC. (a) metode L-R, (b) metode R.

alir. Metode rata-rata bergerak ini diterapkan untuk kedua metode tersebut.

Algoritme rata-rata bergerak adalah sebagai berikut.

1. Inisialisasi parameter motor, yang tergantung pada metode yang digunakan, metode L-R atau metode R, yang akan dijelaskan nanti.
2. Inisialisasi panjang data rata-rata  $n = 50$ .
3. Siapkan memori penyimpanan data tegangan dengan indeks ke-1 sampai dengan indeks ke- $n$ , dan isi semua penyimpanan tegangan dengan nilai 0 V.
4. Siapkan memori penyimpanan data saat ini dengan indeks ke-1 hingga indeks ke- $n$ , dan isi penyimpanan saat ini dengan nilai 0 A.
5. Inisialisasi  $x$  ke 1.
6. Inisialisasi  $V_{a\_lama} = 0$  dan  $I_{a\_lama} = 0$ .
7. Lakukan perulangan sebagai berikut:
  - a. Ambil tegangan dari sensor tegangan dan simpan dalam data tegangan ke- $x$  sebagai  $V[x]$ .
  - b. Ambil arus dari sensor arus dan simpan dalam data arus ke- $x$  sebagai  $I(x)$ .
  - c. Temukan nilai penjumlahan dari 50 data tegangan, dan simpan sebagai  $jum\_v$ .
  - d. Hitung tegangan penyimpanan rata-rata sebagai  $V_{a\_baru} = jum\_v/50$ .
  - e. Temukan nilai jumlah 50 data saat ini yang disimpan sebagai  $jum\_i$ .



Gbr. 2 Rangkaian ekuivalen motor arus searah.

- f. Hitung rata-rata penyimpanan saat ini sebagai  $I_{a\_baru} = \text{jum\_i}/50$ .
- g. Hitung parameter lainnya tergantung metode yang digunakan, apakah metode L-R atau R, yang akan dijelaskan nanti
- h. Hitung  $V_{a\_lama} = V_{a\_baru}$  dan  $I_{a\_lama} = I_{a\_baru}$ .
- i. Nilai  $x$  dinaikkan. Jika  $x > 50$ , maka  $x$  diatur ke 1.
- j. Lanjutkan ke langkah 7.a.

Panjang data  $n = 50$  ditentukan dalam eksperimen, yaitu ketika data derau dihilangkan. Dari percobaan, rata-rata bergerak satu siklus membutuhkan waktu 4 ms. Oleh karena itu, waktu *sampling* ( $dt$ ) diatur sebesar 4 ms. Waktu pengambilan sampel ini digunakan untuk metode pertama (metode L-R).

A. Metode L-R

Rangkaian ekuivalen motor DC ditunjukkan pada Gbr. 2 [14]. Pada gambar tersebut, rangkaian analog menggambarkan transformasi daya listrik dan mekanik motor DC. Dalam ilustrasi ini, arus jangkar ( $i_a$ ) mengalir dalam rangkaian. Beban mekanis harus berputar pada kecepatan sudut ( $\omega_m$ ) agar dapat diputar oleh torsi elektromagnetik ( $T_{em}$ ) yang dihasilkan oleh arus ini. Ketika jangkar berputar pada  $\omega_m$  rpm, tegangan yang dikenal sebagai ggl balik ( $e_a$ ) diinduksi melintasi terminal jangkar. Di sisi listrik, arus mengalir karena  $e_a$  dikalahkan oleh tegangan jangkar ( $v_a$ ).

Dengan bantuan hukum tegangan Kirchhoff, (1) dapat digunakan untuk menyatakan sisi listrik motor DC sebagai arus yang mengalir melalui resistansi dan induktansi belitan jangkar.

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \tag{1}$$

dengan  $v_a$  adalah tegangan suplai jangkar,  $i_a$  adalah arus jangkar,  $R_a$  adalah resistansi jangkar,  $L_a$  adalah induktansi diri jangkar yang disebabkan oleh fluks jangkar, dan  $e_a$  adalah ggl balik.

Dengan menggunakan (1), nilai  $e_a$  dapat diperoleh dengan mengukur nilai  $R_a$  dan  $L_a$  serta  $v_a$  dan  $i_a$ , sehingga diperoleh nilai  $e_a$  menggunakan (2).

$$e_a = v_a - (R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}). \tag{2}$$

Nilai  $e_a$  sebanding dengan  $\omega_m$  dan dapat dihitung menggunakan (3).

$$e_a = k_E \omega_m \tag{3}$$

dengan  $k_E$  adalah konstanta ggl-balik dan  $\omega_m$  adalah kecepatan motor. Dengan nilai  $e_a$  yang dihitung menggunakan (2) dan

nilai  $k_E$  yang diperoleh dari percobaan, kecepatan motor setiap saat dapat dihitung dengan menggunakan (4).

$$\omega_m = \frac{e_a}{k_E}. \tag{4}$$

Berdasarkan (2)-(4), diagram alir *observer* kecepatan motor DC untuk metode L-R dapat disusun seperti pada Gbr. 1(a). Parameter yang dimasukkan dalam program untuk metode L-R adalah  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $k_E$ , dan  $dt$ . Dalam metode L-R ini, perbedaan arus dihitung setiap kali, seperti yang ditunjukkan pada (2).

Nilai resistansi dan induktansi yang tertera pada diagram alir diperoleh dari pengukuran menggunakan LCR meter secara manual. Lalu, nilai  $k_E$  diperoleh menggunakan prosedur berikut:

1. Berikan tegangan masukan motor tertentu.
2. Ukur  $v_a$  menggunakan voltmeter,  $i_a$  menggunakan amperemeter, dan  $\omega_m$  menggunakan takometer. Pengukuran dimulai dari catu daya dihidupkan sampai kecepatan stabil untuk tegangan masukan motor tertentu
3. Hitung  $e_a$  menggunakan (2)
4. Hitung  $k_E$  menggunakan (5) untuk setiap waktu  $t$ ,

$$k_E = \frac{e_a}{\omega_m} \tag{5}$$

5. Hitung rata-rata  $k_E$ .

B. Metode R

*Observer* motor DC metode R merupakan penyederhanaan dari metode L-R. Pada metode ini, kecepatan motor DC tidak memperhitungkan nilai induktansi motor. Induktansi dapat diabaikan karena konstanta waktu mekanik lebih besar secara signifikan daripada konstanta waktu listrik [28]. Nilai  $v_a$  sama dengan jumlah tegangan pada resistansi dan  $e_a$ . Oleh karena itu,  $e_a$  dapat dihitung menggunakan (6).

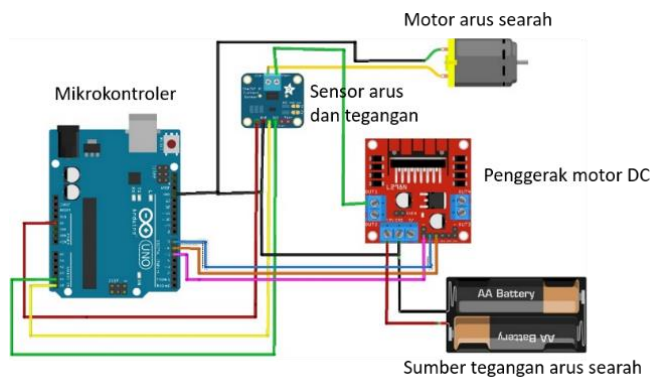
$$e_a = v_a - i_a R_a. \tag{6}$$

Diagram alir *observer* kecepatan motor DC metode R ditunjukkan pada Gbr. 1(b). Pada metode R ini, perhitungan beda arus setiap waktu tidak diperlukan, seperti ditunjukkan pada (6). Oleh karena itu, parameter yang dimasukkan dalam program untuk metode R adalah  $R_a$  dan  $k_E$ .

Seperti pada metode L-R, arus dan tegangan jangkar yang diukur menggunakan sensor arus dan tegangan dirata-rata menggunakan metode rata-rata bergerak untuk menghilangkan derau. Hal ini ditunjukkan pada diagram alir pada Gbr. 1 (b).

Nilai resistansi dan induktansi yang tertera pada diagram alir diperoleh dari pengukuran menggunakan LCR meter, seperti pada metode L-R. Nilai  $k_E$  diperoleh dengan menggunakan prosedur ini berikut.

1. Berikan tegangan motor mulai dari tegangan kecil.
2. Nyalakan daya.
3. Tunggu sampai motor stabil.
4. Ukur tegangan jangkar menggunakan voltmeter, arus jangkar menggunakan amperemeter, dan kecepatan motor menggunakan takometer saat kecepatan motor stabil.
5. Hitung  $e_a$  menggunakan (6).
6. Hitung  $k_E$  menggunakan (5).

Gbr. 3 Rangkaian *observer* motor arus searah.

- Ulangi percobaan 1-6 untuk beberapa tegangan yang lebih besar.

Lalu, kedua metode *observer* di atas diimplementasikan pada motor DC. Untuk menghitung estimasi kecepatan, digunakan sistem mikrokontroler. Rangkaian *observer* yang digunakan ditunjukkan pada Gbr. 3. Terlihat pada Gbr. 3 bahwa sistem mikrokontroler terdiri atas beberapa bagian sebagai berikut: (a) mikrokontroler Arduino Uno, (b) sensor arus dan tegangan INA219, (c) penggerak motor DC L298N, dan (d) baterai atau catu daya DC.

Mikrokontroler Arduino Uno digunakan untuk menghitung kecepatan motor. Sensor INA219 digunakan untuk mengukur arus dan tegangan stator. Arus dan tegangan ini digunakan untuk mengestimasi kecepatan motor. Catu daya DC yang digunakan dalam penelitian ini berjenis variabel.

Hasil implementasi pada motor DC dan sistem mikrokontroler dibandingkan dengan hasil perhitungan *observer* kecepatan secara manual. Yang dimaksudkan dengan secara manual adalah kecepatan estimasi motor DC dihitung setelah arus jangkar diukur menggunakan amperemeter dan tegangan jangkar diukur menggunakan voltmeter. Estimasi kecepatan kemudian dibandingkan dengan kecepatan motor sebenarnya yang diukur menggunakan takometer.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, kedua metode yang dijelaskan dalam metodologi diuji dan dianalisis. Sebelum menguji kedua *observer* tersebut, terlebih dahulu dilakukan pengukuran parameter motor DC, yaitu resistansi dan induktansi motor.

#### A. Pengukuran Parameter Motor

Hasil pengukuran  $R_a$  dan  $L_a$  dengan LCR meter ditunjukkan pada Tabel I. Parameter  $R_a$  dan  $L_a$  diukur dalam empat posisi. Setiap posisi memiliki nilai resistansi dan induktansi, sehingga nilai resistansi dan induktansi bervariasi. Nilai  $R_a$  bervariasi dari 10,60  $\Omega$  sampai dengan 12,65  $\Omega$ , sedangkan nilai  $L_a$  bervariasi dari 5,22 mH sampai dengan 5,54 mH. Dari keempat pengukuran, didapatkan nilai  $R_a$  rata-rata sebesar 11,49  $\Omega$ , sedangkan nilai induktansi rata-rata sebesar 5,43 mH. Nilai rata-rata  $R_a$  dan  $L_a$  kemudian dimasukkan ke dalam program, seperti yang ditunjukkan pada diagram alir dalam Gbr. 1(a). Diagram alir pada Gbr. 1(b) hanya memasukkan nilai  $R_a$  rata-rata saja.

TABEL I  
PENGUKURAN RESISTANSI DAN INDUKTANSI MOTOR

No.	$R_a$ ( $\Omega$ )	$L_a$ (mH)
1	10,60	5,22
2	10,84	5,47
3	11,90	5,54
4	12,65	5,49
Rata-rata	11,49	5,43

TABEL II  
PERHITUNGAN  $k_E$  MENGGUNAKAN METODE L-R

$t$ (detik)	$v_a$ (V)	$\omega_m$ (rpm)	$i_a$ (A)	$e_a$ (V)	$k_E$
5	20,20	4.923,80	0,198	17,92	0,00364
15	20,20	4.948,30	0,189	18,03	0,00364
30	20,22	5.002,30	0,170	18,27	0,00365
45	20,22	5.034,80	0,159	18,39	0,00365
60	20,22	5.038,20	0,158	18,40	0,00365
Rata-rata					0,00365

Perhitungan nilai  $k_E$  untuk metode L-R secara manual ditunjukkan pada Tabel II setiap 5 s. Tegangan masukan yang diberikan adalah 20,22 V. Tegangan  $v_a$  diukur menggunakan voltmeter dan  $i_a$  diukur menggunakan amperemeter. Sementara itu,  $\omega_m$  diukur menggunakan takometer.

Dengan nilai  $R_a$  dan  $L_a$  yang telah diperoleh sebelumnya, yaitu  $R_a = 11,49 \Omega$  dan  $L_a = 5,43$  mH, nilai  $e_a$  dihitung menggunakan (2) dan nilai  $k_E$  dihitung menggunakan (5). Sebagai contoh, perhitungan nilai  $e_a$  berdasarkan (2) ditunjukkan pada (7).

$$e_a = 20,2 - \left( 11,49 * 0,189 + 0,00543 * \frac{0,189 - 0,198}{10} \right) \quad (7)$$

$$= 18,03 \text{ V.}$$

Perhitungan di atas adalah perhitungan  $e_a$  untuk  $t = 15$  s. Nilai  $di_a$  dihitung dari perbedaan antara arus jangkar pada  $t = 15$  s dan arus jangkar pada  $t = 5$  s. Perhitungan lainnya dilakukan dengan cara yang sama. Perhitungan  $di_a$  pada  $t = 5$  s dilakukan dari selisih antara arus jangkar pada  $t = 5$  s dan arus jangkar pada  $t = 0$  s.

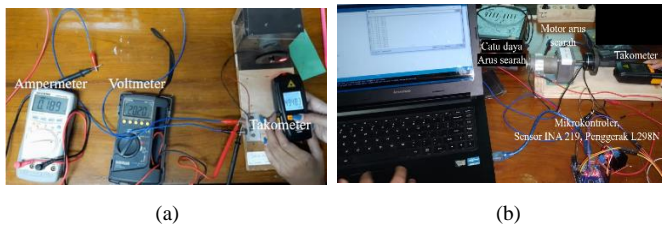
Contoh perhitungan nilai  $k_E$  berdasarkan (5) ditunjukkan pada (8). Perhitungan ini menggunakan nilai  $t = 15$  s. Prosedur perhitungan lainnya sama dengan prosedur perhitungan ini.

$$k_E = \frac{e_a}{\omega_m} = \frac{18,03}{4948,3} = 0,00364 \quad (8)$$

Dari beberapa perhitungan  $k_E$  dapat diperoleh nilai rata-rata  $k_E$  sebesar 0,00365. Nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam program, seperti yang ditunjukkan pada diagram alir di Gbr. 1(a).

Pada Tabel III ditunjukkan perhitungan nilai  $k_E$  untuk metode R bagi lima nilai  $v_a$ , yaitu 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, dan 25 V. Untuk setiap tegangan masukan,  $i_a$  dan  $\omega_m$  diukur ketika kecepatan telah stabil. Hal ini berbeda dari metode L-R. Pada metode L-R, motor diberi satu nilai tegangan. Kemudian, kecepatan, tegangan, dan arus diukur mulai saat daya hidup hingga kecepatan stabil.

Nilai  $e_a$  dihitung menggunakan (6) dengan nilai  $R_a$  yang telah diperoleh sebelumnya. Dalam metode ini, nilai  $L_a$  tidak



Gbr. 4 Pengujian *observer*, (a) metode manual, (b) menggunakan sistem mikrokontroler.

TABEL III  
PERHITUNGAN  $k_E$  MENGGUNAKAN METODE R

$v_a$ (V)	$\omega_m$ (rpm)	$i_a$ (A)	$e_a$ (V)	$k_E$
5	1.140,8	0,130	3,506	0,00307
10	2.336,9	0,135	8,449	0,00362
15	3.652,5	0,151	13,265	0,00363
20	5.007,6	0,162	18,139	0,00362
25	6.315,1	0,178	22,955	0,00363
Rata-rata				0,00352

digunakan. Nilai  $k_E$  kemudian dihitung menggunakan (5). Sebagai contoh, perhitungan nilai  $e_a$  berdasarkan (6) ditunjukkan pada (9). Perhitungan ini menggunakan nilai  $v_a = 5$  V. Prosedur perhitungan lainnya sama dengan perhitungan ini.

Dalam metode L-R, motor diberi suatu nilai tegangan. Kemudian, kecepatan, tegangan, dan arus diukur mulai saat catu daya dinyalakan hingga kecepatan stabil.

$$e_a = v_a - i_a R_a = 5 - 0,13 * 11,49 = 3,506 \text{ V.} \quad (9)$$

Contoh perhitungan nilai  $k_E$  berdasarkan (5) ditunjukkan pada (10). Perhitungan ini untuk  $v_a = 5$  V. Perhitungan lainnya sama dengan perhitungan ini.

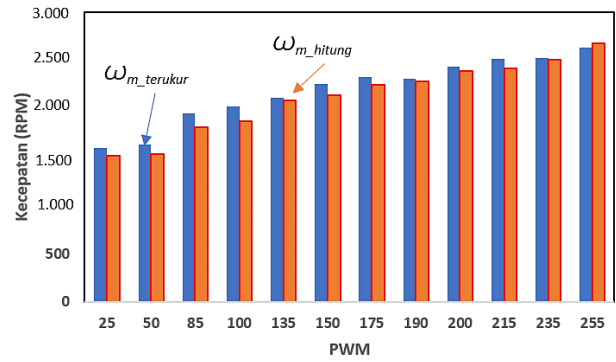
$$k_E = \frac{e_a}{\omega_m} = \frac{3,506}{1140,8} = 0,00307. \quad (10)$$

Dari Tabel III, diperoleh rata-rata  $k_E$  sebesar 0,00352. Nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam program, seperti yang ditunjukkan pada diagram alir dalam Gbr. 1(b).

### B. Hasil Pengujian Observer

*Observer* diuji menggunakan dua metode, yaitu secara manual dan menggunakan sistem mikrokontroler, seperti ditunjukkan pada Gbr. 4. Cara manual ditunjukkan pada Gbr. 4(a). Sebagaimana dijelaskan pada bagian metodologi, dalam metode ini tegangan jangkar diukur menggunakan voltmeter, arus jangkar diukur menggunakan amperemeter, dan kecepatan diukur menggunakan takometer. Dalam Gbr. 4(b) ditunjukkan pengujian *observer* menggunakan sistem mikrokontroler. Rangkaian *observer* motor DC ditunjukkan pada Gbr. 3. Kedua *observer* diuji menggunakan kedua metode pengujian tersebut. Pada bagian ini, pengujian manual dan program yang menggunakan sistem mikrokontroler dianalisis dan dibandingkan untuk mengetahui kedua metode pengujian memiliki hasil yang sama atau mempunyai kecenderungan yang sama atau tidak.

1) *Metode L-R*: Pada Tabel IV ditunjukkan perhitungan *observer* secara manual menggunakan metode L-R. Dalam tabel ini, kecepatan motor yang dihitung ( $\omega_{m\_hitung}$ )



Gbr. 5 Pengujian *observer* metode L-R menggunakan sistem mikrokontroler.

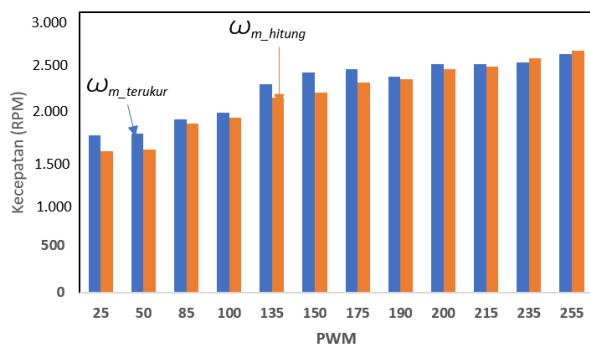
TABEL IV  
PERHITUNGAN MANUAL *OBSERVER* METODE L-R

No.	$\omega_m$ (rpm)	$\omega_{m\_hitung}$ (rpm)	Galat (%)
1	4.923,8	4.913,00	0,22
2	4.948,3	4.941,42	0,14
3	5.002,3	5.006,90	0,09
4	5.034,8	5.041,63	0,14
5	5.038,2	5.044,79	0,13
Rata-rata			0,14

menggunakan (2) dan (4) dibandingkan dengan kecepatan yang diukur menggunakan takometer ( $\omega_{m\_terukur}$ ). Hasil estimasi kecepatan motor pada metode L-R memiliki galat sebesar 0,14%, seperti terlihat pada Tabel IV. Dengan galat  $\ll 5\%$ , perhitungan kecepatan motor dengan metode L-R manual memiliki kinerja yang baik. Hal ini berarti metode L-R cocok untuk mengestimasi kecepatan motor. Metode L-R memiliki kinerja yang baik, yaitu selisih kecepatan yang dihitung dari kecepatan sebenarnya tidak terlalu besar.

Perbandingan antara  $\omega_{m\_hitung}$  dan  $\omega_{m\_terukur}$  pada metode L-R ditunjukkan pada Gbr. 5. Terlihat bahwa kedua nilai tersebut hampir sama, misalnya kecepatan pada nilai PWM 135, 190, dan 235. Sebagian besar  $\omega_{m\_terukur}$  lebih tinggi daripada  $\omega_{m\_hitung}$ , kecuali pada nilai PWM 255. Pada nilai PWM ini,  $\omega_{m\_terukur}$  lebih rendah daripada  $\omega_{m\_hitung}$ . Hasil estimasi kecepatan motor yang diimplementasikan pada motor DC yang sebenarnya menggunakan mikrokontroler Arduino Uno pada metode L-R memiliki rata-rata galat sebesar 3,98%. Dengan galat  $< 5\%$ , implementasi estimasi kecepatan motor dengan metode L-R masih memiliki kinerja yang baik. Hal ini berarti bahwa metode L-R dalam implementasi juga baik untuk mengestimasi kecepatan motor.

2) *Metode R*: Metode R lebih sederhana daripada metode L-R. Dari (6) terlihat bahwa tidak diperlukan nilai  $L_a$  dan perhitungan  $di_a$  setiap waktu. Perhitungan kecepatan motor secara manual menggunakan *observer* metode R ditunjukkan pada Tabel V. Jika dibandingkan dengan  $\omega_{m\_terukur}$ , dapat dilihat bahwa hasil estimasi kecepatan motor pada metode R memiliki rata-rata galat sebesar 5,03%. Hasil estimasi sedikit lebih tinggi dari 5%. Hal ini berarti metode estimasi kecepatan motor kedua memberikan hasil yang kurang tepat dibandingkan dengan metode estimasi kecepatan motor pertama. Kesalahan tertinggi terjadi ketika motor berjalan pada kecepatan rendah.

Gbr. 6 Pengujian *observer* metode R menggunakan sistem mikrokontroler.TABEL V  
PERHITUNGAN MANUAL *OBSERVER* METODE R

No	$\omega_m$ (rpm)	$\omega_{m\_hitung}$ (rpm)	Galat (%)
1	1.140,8	997,24	12,58
2	2.336,9	2.403,26	2,84
3	3.652,5	3.773,30	3,31
4	5.007,6	5.159,70	3,04
5	6.315,1	6.529,75	3,40
Rata-rata			5,03

Terlihat pada tabel bahwa saat motor berjalan pada 1.140,8 rpm, terjadi galat sebesar 12,58%. Hal ini berarti hasil estimasi kecepatan jauh dari kecepatan yang sebenarnya. Maka, dapat dikatakan bahwa metode ini cocok untuk mengestimasi kecepatan motor pada kecepatan tinggi karena pada kecepatan yang lebih tinggi, kesalahannya di bawah 4%.

Perbandingan antara  $\omega_{m\_hitung}$  dan  $\omega_{m\_terukur}$  pada metode R ditunjukkan pada Gbr. 6. Sebagian besar  $\omega_{m\_terukur}$  lebih tinggi dari  $\omega_{m\_hitung}$ , seperti hasil metode L-R, tetapi perbedaan pada metode R lebih besar daripada pada metode L-R. Perbedaan yang lebih besar terjadi pada nilai PWM 25, 50, 135, 150, dan 175. Nilai PWM lainnya memiliki perbedaan yang lebih kecil, seperti kecepatan pada nilai PWM 190-255. Hasil estimasi kecepatan motor yang diimplementasikan pada motor DC yang sebenarnya menggunakan sistem mikrokontroler Arduino Uno pada metode R memiliki rata-rata galat sebesar 4,87%. Galat yang terjadi di bawah 5%, tetapi persentase kesalahan lebih tinggi dari persentase kesalahan pada metode L-R.

Dari pembahasan di atas, diketahui bahwa estimasi kecepatan metode R kurang tepat dibandingkan dengan metode L-R, baik perhitungan manual maupun menggunakan sistem mikrokontroler. Oleh karena itu, untuk mengestimasi kecepatan motor, lebih baik digunakan metode L-R. Metode R memiliki keunggulan yaitu lebih sederhana dibandingkan dengan metode L-R. Pada metode ini, tidak perlu diukur  $L_a$  motor DC pada beberapa posisi. Dengan persentase galat < 5%, metode R masih dapat digunakan untuk mengestimasi kecepatan motor DC, walaupun galat rata-rata lebih besar daripada metode L-R. Jika metode R digunakan untuk mengestimasi kecepatan motor, diperlukan penambahan program untuk mengatur kecepatan tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan mikrokontroler untuk melakukan kalibrasi hasil estimasi kecepatan, sehingga sesuai dengan kecepatan motor yang sebenarnya. Sebagai contoh,

dengan menggunakan persamaan linier, kecepatan motor DC dapat diatur menggunakan (11). Persentase galat pada kondisi terkalibrasi ini adalah 1,84%.

$$\omega_{m\_terkalibrasi} = 0.9\omega_{m\_hitung} + 282,61. \quad (11)$$

#### IV. KESIMPULAN

Metode R lebih sederhana tetapi estimasi kecepatannya kurang tepat dibandingkan dengan metode L-R. Dengan perhitungan manual, hasil estimasi kecepatan motor pada metode L-R memiliki galat sebesar 0,14%, sedangkan hasil estimasi kecepatan motor pada metode R memiliki galat sebesar 5,03%. Hasil estimasi kecepatan motor yang diimplementasikan pada motor DC yang sebenarnya pada metode L-R memiliki galat sebesar 3,98%, sedangkan hasil estimasi kecepatan motor pada metode R memiliki galat sebesar 4,87%.

#### KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis yang namanya tercantum dalam artikel berjudul “Perbandingan Dua *Observer* Kecepatan Motor Arus Searah pada Sistem Kendali tanpa Sensor Kecepatan” menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

#### KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Bernadeta Wuri Harini; metodologi penelitian, Tjendro; perangkat lunak, Martanto; validasi, Tjendro; analisis formal, Bernadeta Wuri Harini; sumber, Martanto; tulisan—Bernadeta Wuri Harini.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada LPPM Universitas Sanata Dharma yang telah mendukung penelitian ini.

#### REFERENSI

- [1] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. New York, USA: Oxford University Press, 1998.
- [2] A. Glumineau dan J. de León Morales, *Sensorless AC Electric Motor Control*. London, UK: Springer, 2015.
- [3] F. Yusivar dan N. Avianto Wicaksono, “Simulasi Mesin Induksi tanpa Sensor Kecepatan Menggunakan Pengendali Orientasi Vektor,” *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 4, No. 4, hal. 250–257, Nov. 2016.
- [4] J. Agrawal dan S. Bodkhe, “Low-Speed Sensorless Control of PMSM Drive Using High Frequency Signal Injection,” *2015 Annu. IEEE India Conf. (INDICON)*, 2016, hal. 1–6.
- [5] O.M. Arafa, G.A.A. Aziz, M.I.A. El-Sebah, dan A.A. Mansour, “Observer-Based Sensorless Speed Control of PMSM: A Focus on Drive’s Startup,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, Vol. 3, No. 2, hal. 181–209, Sep. 2016.
- [6] B.W. Harini, “Pengaruh Parameter Motor pada Sistem Kendali tanpa Sensor Putaran,” *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 10, No. 3, hal. 236–242, Agu. 2021.
- [7] Z. Alpholcity X., S.S. Bhandari, P.P. Dsouza, dan D.C. Raina, “Personal Assistant Robot,” *Int. J. Appl. Sci., Smart Technol.*, Vol. 3, No. 2, hal. 145–152, 2021.
- [8] M.R.A Cahyono, I. Mariza, dan Wirawan, “Sistem Pemantauan dan Pengendalian Sepeda Listrik Berbasis Internet of Things,” *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 11, No. 1, hal. 53–60, 2022.
- [9] B. Wuri, P. Setyo, dan Y. Krisma, “Kinerja Panel Surya dengan Pelacak Matahari Dual Aksis Menggunakan Algoritma Berbasis Sensor LDR,” *Proc. Sem. Nas. Ilmu Sos., Teknol. (SNISTEK) 4*, 2022, hal. 49–54.

- [10] A. Suryanto, dkk., "Optimalisasi Keluaran Panel Surya Menggunakan Solar Tracker Berbasis Kamera Terintegrasi Raspberry Pi," *J. Nas. Tek. Elekt., Teknol. Inf.*, Vol. 10, No. 3, hal. 282–290, Agu. 2021.
- [11] E. Maharddhika dan L. Widjiantoro, "Rancangan Observer Kecepatan untuk Motor DC pada PLC," *J. Tek. ITS*, Vol. 9, No. 2, hal. 236–241, Sep. 2020.
- [12] T. Abut, "Control of a DC Motor Using Sensorless Observer Based Sliding Mode Control Method," *Int. J. Eng. Trends Technol.*, Vol. 66, No. 2, hal. 67–72, Des. 2018.
- [13] T. Georgiev dan M. Mikhov, "A Sensorless Speed Control System for DC Motor Drives," *Sci. J. Riga Tech. Univ. Power, Electr. Eng.*, Vol. 25, No. 25, hal. 155–158, Okt. 2009.
- [14] M. Vidlak, L. Gorel, P. Makys, dan M. Stano, "Sensorless Speed Control of Brushed DC Motor Based at New Current Ripple Component Signal Processing," *Energies*, Vol. 14, No. 17, hal. 1–24, Agu. 2021.
- [15] B.W. Harini, A. Subiantoro, dan F. Yusivar, "Stability of the Rotor Flux Oriented Speed Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Control," *2018 IEEE 27th Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)*, 2018, hal. 283–289.
- [16] B.W. Harini, "The Effect of Motor Parameters on the Induction Motor Speed Sensorless Control System Using Luenberger Observer," *Int. J. Appl. Sci., Smart Technol.*, Vol. 4, No. 1, hal. 59–74, Jun. 2022.
- [17] G. Tian, dkk., "Rotor Position Estimation of Sensorless PMSM Based on Extended Kalman Filter," *2018 IEEE Int. Conf. Mechatron., Robot., Autom. (ICMRA)*, 2018, hal. 12–16.
- [18] S. Hussain dan M.A. Bazaz, "Sensorless Control of PMSM Using Extended Kalman Filter with Sliding Mode Controller," *2014 IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives, Energy Syst. (PEDES)*, 2014, hal. 1–5.
- [19] R.P. Tripathi, A.K. Singh, P. Gangwar, dan R.K. Verma, "Sensorless Speed Control of DC Motor Using EKF Estimator and TSK Fuzzy Logic Controller," *Automat.*, Vol. 63, No. 2, hal. 338–348, Jan. 2022.
- [20] H. Kim, J. Son, dan J. Lee, "A High-Speed Sliding-Mode Observer for the Sensorless Speed Control of a PMSM," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 58, No. 9, hal. 4069–4077, Sep. 2011.
- [21] Y. Zhang, Y. Nie, dan L. Chen, "Adaptive Fuzzy Fault-Tolerant Control Against Time-Varying Faults via A New Sliding Mode Observer Method," *Symmetry*, Vol. 13, No. 9, hal. 1–19, Sep. 2021.
- [22] Z. Li, dkk., "Design of Sensorless Speed Control System for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Based on Fuzzy Super-Twisted Sliding Mode Observer," *Electron.*, Vol. 11, No. 9, hal. 1–15, Apr. 2022.
- [23] L. Saihi, A. Bouhenna, M. Chenafa, dan A. Mansouri, "A Robust Sensorless SMC of PMSM Based on Sliding Mode Observer and Extended Kalman Filter," *2015 4th Int. Conf. Elect. Eng. (ICEE)*, 2015, hal. 1–4.
- [24] B.W. Harini, F. Husnayain, A. Subiantoro, dan F. Yusivar, "A Synchronization Loss Detection Method for PMSM Speed Sensorless Control," *J. Teknol.*, Vol. 82, No. 4, hal. 47–54, Mei 2020.
- [25] L. Colombo, dkk., "An Embedded Strategy for Online Identification of PMSM Parameters and Sensorless Control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Vol. 27, No. 6, hal. 2444–2452, Nov. 2019.
- [26] Q. Wang, dkk., "An Impedance Model-Based Multiparameter Identification Method of PMSM for Both Offline and Online Conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 36, No. 1, hal. 727–738, Jan. 2021.
- [27] X. Ma dan C. Bi, "A Technology for Online Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, Vol. 4, No. 3, hal. 237–242, Sep. 2020.
- [28] P. Radcliffe dan D. Kumar, "Sensorless Speed Measurement for Brushed DC Motors," *IET Power Electron.*, Vol. 8, No. 11, hal. 2223–2228, Sep. 2015.