

BAB II DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai *rancang bangun alat kalibrator tachometer berbasis mikrokontroler Arduino Uno dengan menggunakan sensor optocoupler* merupakan topik yang berada pada bidang pengukuran kecepatan rotasi dan kalibrasi alat ukur. Arduino Uno dikenal sebagai mikrokontroler yang mudah diprogram, fleksibel, serta mampu mengolah sinyal digital dari sensor untuk menghasilkan nilai RPM dengan tingkat akurasi yang baik. Sementara itu, sensor optocoupler banyak digunakan dalam pengukuran kecepatan rotasi karena kemampuannya mendeteksi pulsa secara presisi tanpa kontak langsung dengan objek yang diukur. Kombinasi kedua komponen ini memungkinkan terciptanya alat kalibrator tachometer yang portable, akurat, dan ekonomis, sehingga dapat menjadi solusi alternatif untuk kebutuhan kalibrasi di lapangan.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas topik yang relevan. Saputra (2018) merancang sistem pengaturan kecepatan motor DC berbasis Arduino Uno dengan kendali PWM. Penelitian ini membuktikan bahwa Arduino mampu mengatur putaran motor secara presisi dan membaca sinyal dari sensor kecepatan untuk dikonversi menjadi nilai RPM, namun fokusnya adalah pada kendali motor, bukan pada fungsi kalibrasi tachometer [1].

Dody Susilo dan Maghfiroh (2022) mengembangkan sensor pengukur kecepatan berbasis mikrokontroler ATmega dengan menggunakan sensor optocoupler. Hasil penelitian mereka menunjukkan tingkat error di bawah 5% pada RPM tinggi, sehingga membuktikan efektivitas optocoupler sebagai sensor kecepatan. Meski demikian, penelitian tersebut belum mengarah pada penerapan sebagai kalibrator tachometer yang bersifat portable [6].

Penelitian oleh K. Utomo et al. (2024) berfokus pada konversi pulsa encoder menjadi tegangan untuk mempermudah pembacaan RPM. Meskipun hasilnya stabil, penelitian ini tidak dirancang untuk menguji akurasi tachometer secara langsung [4].

Pratama et al. (2024) mengembangkan trainer berbasis Arduino dan LabVIEW yang menggunakan logika fuzzy untuk mengontrol kecepatan motor DC. Walaupun penelitian ini memperlihatkan fleksibilitas tinggi dalam kendali motor, fokus utamanya bukan pada kalibrasi alat ukur RPM [7].

Sementara itu, Supriyo et al. (2024) mengimplementasikan perancangan alat ukur berbasis Arduino yang ringan dan mudah digunakan dalam praktikum, namun belum diarahkan sebagai alat kalibrator tachometer [4].

Berdasarkan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa Arduino Uno dan sensor optocoupler telah terbukti akurat dalam pengukuran kecepatan rotasi, serta konsep portabilitas alat ukur sudah pernah dibahas pada beberapa penelitian. Namun, belum ada penelitian yang secara khusus menggabungkan Arduino Uno dan optocoupler dalam satu sistem portable yang dirancang sebagai media kalibrator tachometer untuk penggunaan langsung di lapangan. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut, dengan mengembangkan alat kalibrator tachometer yang portable, ekonomis, akurat, dan praktis digunakan oleh teknisi lapangan.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Peneliti dan Tahun	Fokus Penelitian	Metode / Sensor Utama	Kelebihan	Kelemahan / Celah Penelitian	Kontribusi Terhadap Penelitian ini
1.	Saputra (2018)	Pengaturan kecepatan motor DC berbasis Arduino Uno dengan PWM	Arduino Uno + PWM	Mampu mengatur putaran motor dengan presisi	Tidak fokus pada kalibrasi tachometer	Penelitian Saputra (2018) menjadi dasar dalam penerapan pengaturan kecepatan motor DC menggunakan Arduino

						Uno dan sinyal PWM. Pada penelitian ini konsep tersebut dikembangkan dengan menambahkan kontrol PID sebagai pengendali kecepatan serta diterapkan pada media kalibrator tachometer yang bersifat portabel.
2.	Dody Susilo & Maghfirah (2022)	Sensor pengukur kecepatan berbasis ATmega dengan optocoupler	Optocoupler	Error pembacaan <5% pada RPM tinggi	Tidak dirancang untuk portabilitas atau fungsi kalibrasi	Penelitian Dody Susilo & Mashfiroh (2022) menjadi referensi dalam penggunaan sensor optocoupler sebagai pembaca

						kecepatan putar karena memiliki tingkat kesalahan pembacaan yang rendah. Pada penelitian ini sensor optocoupler tidak hanya digunakan untuk pengukuran RPM, tetapi juga sebagai umpan balik (feedback) bagi sistem kontrol PID pada alat kalibrator tachometer.
3.	K. Utomo et al. (2024)	Konversi pulsa encoder menjadi tegangan untuk pembacaan RPM	Rotary Encoder	Hasil konversi stabil dan mudah dibaca	Tidak diarahkan untuk menguji tachometer	Penelitian K. Utomo et al. (2024) menjadi referensi dalam proses pembacaan dan

						<p>pengolahan sinyal putaran. Penelitian ini mengembangkan konsep tersebut dengan menggunakan sensor optocoupler sebagai pembaca RPM yang dipadukan dengan proses filtering dan kontrol PID sehingga diperoleh pembacaan yang lebih stabil sebagai acuan kalibrasi.</p>
4.	Pratama et al. (2024)	Trainer pengendali motor DC berbasis Arduino	Arduino Uno + Fuzzy Logic	Memiliki fleksibilitas tinggi dalam pengendali	Tidak fokus pada akurasi RPM sebagai	Penelitian Pratama et al. (2024) menjadi referensi mengenai

		& LabVIEW dengan logika fuzzy		ian kecepatan	referensi kalibrasi	sistem pengendalian kecepatan motor berbasis mikrokontrol er. Perbedaanny a, penelitian ini menggunaka n metode PID yang dikombinasik an dengan Moving Average Filter (MAF) dan Exponential Moving Average (EMA) untuk meningkatka n kestabilan pembacaan RPM pada sistem kalibrator tachometer.
--	--	---	--	------------------	------------------------	--

5.	Supriyo et al. (2024)	Perancangan alat ukur berbasis Arduino yang ringkas untuk kebutuhan praktikum	Arduino Uno + Sensor Kecepatan	Portabel dan ringan	Tidak didesain khusus untuk kalibrasi tachometer	Penelitian Supriyo et al. (2024) menjadi referensi dalam perancangan perangkat berbasis Arduino yang ringkas dan mudah digunakan. Penelitian ini mengembangkan konsep tersebut dengan merancang alat kalibrator tachometer yang bersifat portabel, dilengkapi sistem kontrol PID, serta proses filtering menggunakan MAF dan EMA untuk meningkatkan
----	-----------------------	---	--------------------------------	---------------------	--	---

						n akurasi dan kestabilan pengukuran.
--	--	--	--	--	--	--------------------------------------

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, dapat diketahui bahwa telah banyak penelitian yang membahas pengendalian kecepatan motor, pembacaan kecepatan menggunakan sensor optocoupler, maupun pengembangan perangkat berbasis Arduino Uno. Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih berfokus pada salah satu aspek, seperti pengendalian kecepatan, pembacaan RPM, atau perancangan perangkat, dan belum mengintegrasikan seluruh aspek tersebut dalam satu sistem kalibrator tachometer yang bersifat portabel. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan alat kalibrator tachometer berbasis mikrokontroler Arduino Uno dengan sensor optocoupler yang menerapkan kontrol PID serta kombinasi *Moving Average Filter* (MAF) dan *Exponential Moving Average* (EMA) untuk memperoleh pembacaan RPM yang lebih stabil dan akurat sehingga dapat digunakan sebagai media kalibrasi tachometer.

2.2 Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengetahui kecepatan rotasi suatu objek dalam satuan RPM (*Revolution Per Minute*). Alat ini digunakan secara luas dalam sistem industri, otomotif, serta berbagai aplikasi teknik lainnya yang memerlukan pengukuran kecepatan putar [1]. Dalam penelitian ini, tachometer menjadi objek yang akan dikalibrasi untuk memastikan akurasi dalam mengukur kecepatan. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan tachometer terhadap nilai kecepatan referensi yang dihasilkan oleh sistem berbasis mikrokontroler Arduino Uno [2]. Celah dari beberapa penelitian sebelumnya adalah kurangnya media kalibrator portabel yang mampu memverifikasi hasil tachometer dengan presisi tinggi di luar laboratorium. Tachometer ditunjukkan pada Gambar 2. 1.



Gambar 2. 1 Tachometer

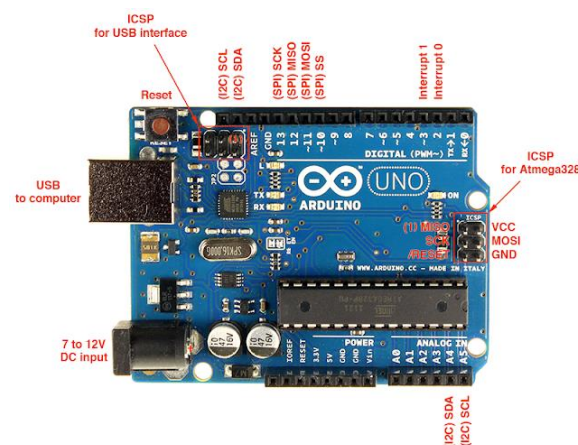
2.3 Kalibrasi Alat Ukur

Kalibrasi adalah proses membandingkan hasil pengukuran dari suatu alat ukur dengan standar acuan yang telah ditetapkan untuk memastikan bahwa alat tersebut memberikan hasil yang akurat dan dapat dipercaya. Proses ini bertujuan untuk mengurangi deviasi dan memastikan bahwa alat ukur beroperasi dalam batas toleransi yang diizinkan [2]. Dalam konteks sistem industri, kalibrasi menjadi penting untuk menjaga kualitas, keamanan, dan efisiensi operasional, terutama untuk alat ukur seperti tachometer yang berperan dalam pengendalian kecepatan mesin. Alat ukur yang tidak terkalibrasi dapat memberikan data yang menyesatkan dan berdampak pada performa proses produksi [5]. Rancang bangun alat kalibrator tachometer ini dirancang sebagai perangkat penghasil referensi kecepatan rotasi yang dapat dibandingkan dengan hasil pembacaan tachometer. Dengan mengatur kecepatan putar poros melalui mikrokontroler dan membaca nilainya menggunakan sensor optocoupler, sistem dapat menjadi acuan untuk melakukan verifikasi keakuratan tachometer secara langsung di lapangan [4]. Oleh karena itu, kebutuhan akan alat kalibrator portabel menjadi sangat penting, terutama untuk teknisi lapangan yang memerlukan verifikasi cepat tanpa harus membawa alat ke fasilitas kalibrasi.

2.4 Mikrokontroler Arduino Uno

Arduino Uno merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi kendali dan monitoring. Arduino

memiliki keunggulan dari segi fleksibilitas, biaya rendah, serta komunitas pengguna yang besar [5]. Dalam sistem pengukuran kecepatan, Arduino Uno digunakan sebagai pemroses sinyal dari sensor kecepatan untuk menghitung RPM. Dalam penelitian oleh Saputra et al., Arduino digunakan sebagai penghasil sinyal PWM untuk pengaturan kecepatan motor DC [6]. Penelitian mereka juga menunjukkan bahwa integrasi Arduino dengan LCD dan optocoupler dapat menghasilkan alat ukur rotasi yang handal. Dalam penelitian ini, Arduino Uno berperan sebagai otak utama sistem kalibrator yang bertugas membaca sinyal dari sensor dan menghitung nilai referensi RPM yang nantinya digunakan untuk membandingkan performa tachometer. Mikrokontroler arduino uno ditunjukkan pada Gambar 2. 2.

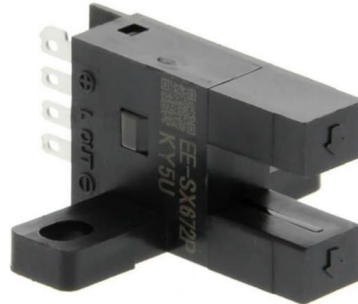


Gambar 2. 2 Mikrokontroler Arduino Uno

2.5 Sensor Optocoupler

Sensor optocoupler bekerja dengan prinsip pemisahan sinyal listrik menggunakan cahaya. Dalam sistem pengukuran kecepatan, sensor ini digunakan untuk mendeteksi jumlah pulsa yang dilewatkan oleh obyek berputar (poros), kemudian dikonversi menjadi nilai RPM oleh mikrokontroler [7]. Menurut penelitian oleh Rievqi (2014), sensor optocoupler BS5-T2M memiliki sensitivitas tinggi dan cocok digunakan dalam aplikasi pengukuran kecepatan motor DC dengan tingkat akurasi tinggi [8]. Dody Susilo dkk. juga membuktikan bahwa penggunaan optocoupler untuk membaca RPM menghasilkan error pembacaan kurang dari 5% pada kecepatan tinggi, menjadikannya cukup handal untuk aplikasi monitoring dan kalibrasi [9]. Namun, dengan pemilihan jenis optocoupler yang tepat, desain sistem yang optimal, dan kalibrasi yang akurat, tingkat kesalahan

dapat diminimalkan hingga mendekati nol, meningkatkan keandalan sistem dalam aplikasi yang memerlukan presisi tinggi. Sensor optocoupler ditunjukkan pada Gambar 2. 3.



Gambar 2. 3 Modul Sensor Optocoupler Omron EE-SX672

2.6 Kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*)

Kontrol PID (Proportional Integral Derivative) merupakan salah satu metode pengendalian yang paling banyak digunakan dalam sistem kontrol industri maupun instrumentasi karena memiliki respon yang sederhana, stabil, dan mudah diterapkan. Berdasarkan jurnal “*Sistem Pengendalian Kestabilan Pesawat Tanpa Awak Berbasis Kontrol PID*”, metode PID bekerja dengan cara menganalisis kesalahan (*error*) yang terjadi antara nilai set point dengan keluaran sistem, kemudian menghasilkan aksi koreksi agar sistem dapat mencapai kondisi yang diinginkan [10].

Pada sistem kontrol, PID terdiri dari tiga parameter utama yaitu proportional (P), integral (I), dan derivative (D). Ketiga parameter tersebut dapat digunakan secara bersamaan untuk memperoleh respon sistem yang cepat, stabil, dan memiliki error yang kecil. Menurut jurnal yang digunakan, pengendali PID secara terus-menerus menghitung nilai error sebagai selisih antara nilai referensi (*set point*) dan nilai keluaran sistem (*output*) [10].

Persamaan 2.1 umum pengendali PID adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Keterangan:

- $(u(t))$ = sinyal kontrol
- $(e(t))$ = error
- (K_p) = konstanta proportional

- (K_i) = konstanta integral
- (K_d) = konstanta derivative

Komponen proportional (P) berfungsi untuk mempercepat respon sistem terhadap error. Nilai proportional akan menghasilkan aksi kontrol yang sebanding dengan besar error yang terjadi. Semakin besar nilai error, maka aksi kontrol yang diberikan juga semakin besar. Pada jurnal dijelaskan bahwa proportional berfungsi sebagai penguat (*gain*) tanpa memberikan efek dinamik pada sistem [10].

Komponen integral (I) digunakan untuk mengurangi dan menghilangkan error pada kondisi tunak (*steady state error*). Aksi integral bekerja dengan menjumlahkan error terhadap waktu sehingga sistem dapat mencapai nilai set point dengan lebih akurat. Namun, penggunaan nilai integral yang terlalu besar dapat menyebabkan respon sistem menjadi lebih lambat. Penjelasan mengenai fungsi integral dalam mengurangi *steady state error* dijelaskan pada jurnal bagian kontrol PID [10].

Komponen derivative (D) berfungsi untuk memperbaiki kestabilan sistem dengan cara mengurangi overshoot dan mempercepat waktu stabil (*settling time*). Aksi derivative bekerja berdasarkan perubahan error terhadap waktu sehingga mampu memprediksi arah perubahan sistem. Pada jurnal disebutkan bahwa derivative digunakan untuk mengurangi efek berlebihan (*overshoot*) yang dihasilkan oleh sistem [10].

Dalam penelitian ini, metode PID digunakan untuk mengontrol kecepatan putaran motor pada alat kalibrator tachometer berbasis Arduino Uno. Nilai RPM hasil pembacaan sensor optocoupler akan dibandingkan dengan nilai set point yang ditentukan. Selisih antara nilai aktual dan set point digunakan sebagai nilai error yang kemudian diproses oleh kontrol PID untuk menghasilkan sinyal PWM sebagai pengatur kecepatan motor. Dengan menggunakan metode PID, sistem diharapkan mampu mempertahankan putaran motor tetap stabil dan memiliki tingkat error yang kecil sehingga hasil kalibrasi tachometer menjadi lebih akurat. Keberhasilan penerapan kontrol PID tidak hanya ditentukan oleh kemampuan sistem dalam mencapai nilai setpoint, tetapi juga dievaluasi berdasarkan karakteristik respon sistem. Parameter yang digunakan meliputi *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*. Keempat parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam

proses penentuan konstanta PID menggunakan metode trial and error sehingga diperoleh respon sistem yang cepat, stabil, dan memiliki kesalahan yang kecil.

2.7 Moving Average Filter

Moving Average Filter (MAF) merupakan salah satu metode filter digital yang digunakan untuk mengurangi noise dan fluktuasi data hasil pembacaan sensor. Metode ini bekerja dengan menghitung nilai rata-rata dari sejumlah data sebelumnya dalam rentang tertentu (*window size*) sehingga menghasilkan keluaran data yang lebih halus dan stabil [11].

Berdasarkan jurnal “*Penerapan Digital Moving Average Filter Pada Sensor Dissolved Oxygen Untuk Mengukur Kualitas Air*”, Moving Average Filter digunakan untuk memperbaiki kualitas sinyal pembacaan sensor dengan cara mereduksi noise sehingga data hasil pengukuran menjadi lebih presisi. Pada jurnal tersebut dijelaskan bahwa kendala utama dalam proses pembacaan sensor adalah adanya noise dan fluktuasi data yang menyebabkan kualitas pembacaan menjadi kurang baik. Oleh karena itu, filter digital diterapkan untuk meminimalkan noise pada sinyal sensor [11].

Moving Average Filter bekerja dengan cara mengambil beberapa data pembacaan terakhir kemudian menghitung nilai rata-ratanya. Hasil rata-rata tersebut digunakan sebagai data keluaran baru sehingga perubahan data menjadi lebih halus. Pada jurnal dijelaskan bahwa sistem kerja filter ini menggunakan nilai rata-rata dari sekumpulan data yang diterima dalam rentang waktu tertentu. Selain itu, filter MAF juga mampu membuang penyimpangan data (*outlier*) sehingga data yang dihasilkan menjadi lebih relevan dan stabil [11].

Persamaan 2.2 umum Simple Moving Average (SMA) adalah sebagai berikut:

$$SMA = \frac{X_m + X_{m-1} + \dots + X_{m-(n-1)}}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_{m-i} \quad (2.2)$$

Keterangan:

- (SMA) = nilai rata-rata data
- (X_m) = data terbaru
- (n) = jumlah data atau ukuran window

Pada jurnal dijelaskan bahwa ukuran *window* sangat mempengaruhi hasil filtering. Semakin besar ukuran *window*, maka fluktuasi data akan semakin kecil sehingga hasil pembacaan sensor menjadi lebih stabil. Namun, penggunaan ukuran *window* yang terlalu besar dapat menyebabkan respon sistem menjadi lebih lambat. Hasil penelitian pada jurnal menunjukkan bahwa penggunaan Moving Average Filter mampu menghasilkan data sensor yang lebih halus dibandingkan data tanpa filter [11].

Dalam penelitian ini, *Moving Average Filter* diterapkan pada hasil pembacaan RPM dari sensor optocoupler sebelum data digunakan sebagai masukan sistem kontrol PID. Filter ini bekerja dengan menghitung rata-rata sejumlah data pembacaan sebelumnya sesuai ukuran *window* yang ditentukan sehingga fluktuasi sesaat akibat noise dapat dikurangi. Dengan demikian, data RPM yang digunakan sebagai masukan pengendali menjadi lebih stabil dan tidak mudah dipengaruhi oleh gangguan pembacaan sensor. Persamaan (2.2) digunakan secara langsung dalam program Arduino untuk menghitung nilai rata-rata beberapa data RPM hasil pembacaan sensor optocoupler sebelum diproses lebih lanjut.

2.8 Exponential Moving Average (EMA)

Exponential Moving Average (EMA) merupakan metode filtering yang digunakan untuk memperhalus data dengan memberikan bobot lebih besar terhadap data terbaru dibandingkan data sebelumnya. Metode ini banyak digunakan pada sistem kontrol dan pengolahan sinyal karena mampu mengurangi fluktuasi data tanpa menghilangkan karakteristik utama dari sinyal tersebut [12].

Berdasarkan jurnal "*Robust Online Model Adaptation by Extended Kalman Filter with Exponential Moving Average and Dynamic Multi-Epoch Strategy*", metode EMA digunakan untuk meningkatkan proses konvergensi dan mengurangi osilasi pada sistem adaptasi berbasis Extended Kalman Filter (EKF). Pada jurnal dijelaskan bahwa EMA diterapkan untuk mempercepat konvergensi parameter estimasi serta memperhalus perubahan nilai selama proses adaptasi berlangsung [12].

Secara umum, EMA bekerja dengan cara menggabungkan data terbaru dengan data sebelumnya menggunakan faktor pembobot tertentu. Data terbaru akan

memiliki pengaruh lebih besar dibandingkan data lama sehingga respon sistem menjadi lebih cepat terhadap perubahan.

Persamaan 2.3 umum Exponential Moving Average adalah sebagai berikut:

$$EMA_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)EMA_{t-1} \quad (2.3)$$

Keterangan:

- (EMA_t) = nilai EMA saat ini
- (X_t) = data terbaru
- (EMA_{t-1}) = nilai EMA sebelumnya
- (α) = faktor smoothing ($(0 < \alpha < 1)$)

Nilai faktor smoothing (α) menentukan tingkat sensitivitas filter terhadap perubahan data. Jika nilai (α) semakin besar, maka respon filter terhadap perubahan data akan semakin cepat. Sebaliknya, jika nilai (α) semakin kecil, maka hasil filtering akan menjadi lebih halus namun respon sistem menjadi lebih lambat [12].

Pada jurnal dijelaskan bahwa EMA digunakan untuk melakukan filtering terhadap proses pembaruan parameter sehingga dapat mempercepat konvergensi dan meredam osilasi pada sistem optimasi. Selain itu, EMA juga digunakan untuk memperhalus perubahan nilai parameter internal sistem agar lebih stabil terhadap gangguan atau data anomali [12].

Metode EMA memiliki kelebihan dibandingkan metode moving average biasa karena lebih responsif terhadap perubahan data terbaru. Pada jurnal disebutkan bahwa EMA mampu membantu mempercepat proses optimasi dan meningkatkan stabilitas sistem. Oleh karena itu, metode EMA banyak diterapkan pada sistem kontrol, pengolahan sinyal, dan pembacaan sensor [12].

Dalam penelitian ini, metode EMA digunakan untuk memperhalus hasil pembacaan RPM dari sensor optocoupler pada alat kalibrator tachometer berbasis Arduino Uno. Pembacaan sensor yang berubah-ubah akibat noise atau fluktuasi putaran motor dapat menyebabkan nilai RPM menjadi tidak stabil. Dengan menerapkan filter EMA, data RPM dapat menjadi lebih halus dan stabil sehingga proses kontrol PID dapat bekerja lebih optimal. Penggunaan EMA pada sistem ini diharapkan mampu mengurangi noise pembacaan sensor, mempercepat respon

sistem, serta meningkatkan akurasi hasil kalibrasi tachometer. Setelah data RPM diproses menggunakan Moving Average Filter, nilai tersebut kemudian diproses kembali menggunakan Exponential Moving Average. Persamaan (2.3) digunakan dalam program Arduino untuk memberikan pembobotan yang lebih besar terhadap data pembacaan terbaru sehingga sistem tetap responsif terhadap perubahan kecepatan putar, namun tetap mampu meredam fluktuasi pembacaan sensor. Kombinasi Moving Average Filter dan Exponential Moving Average menghasilkan data RPM yang lebih stabil dibandingkan menggunakan salah satu metode filtering saja. Data hasil filtering tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan bagi kontrol PID dalam menghasilkan sinyal PWM untuk mengendalikan kecepatan putar motor.