

# Sistem Kontrol Kendaraan *Electric Hybrid* Roda Dua Terintegrasi Berbasis Kalman Filter

I Nyoman Bima Permana, I Wayan Widhiada, I Made Widiyarta  
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Sistem kontrol menjadi masalah yang signifikan dalam pengaturan berkendara yang terjadi pada sepeda motor *electric hybrid*, terutama pada peralihan antar sistem *electric* dengan *gasoline*. Menuju lebih ke hilir, pengaturan ini tentunya berpengaruh besar terhadap manajemen energi kendaraan. Untuk lebih spesifik, munculnya noise pada sensor potensiometer sebagai imitasi sudut bukaan throttle merupakan bagian mayor dari permasalahan sistem kontrol. Dengan demikian, rancangan sistem kontrol yang mereduksi noise sensor potensiometer dibutuhkan untuk optimasi yang dimaksud. Rancangan sistem kontrol ini dilakukan dengan mengimplementasikan algoritma Kalman Filter pada sistem kontrol kendaraan. Algoritma ini secara langsung di-deploy dan keseluruhan prosesnya dibuat melalui Arduino IDE (dengan basis pemrograman bahasa C++). Perbandingan antara sistem kontrol tanpa Kalman Filter dan dengan Kalman Filter dilakukan pada kendaraan Spin 125 Suzuki dengan penambahan modifikasi *electric* berupa Motor Brushless Direct Current (BLDC) 60 Volt/1000 Watt, baterai Lithium-Ion 60 Volt/14,7 Ah, dan microcontroller Arduino Mega2650 serta STM32 board. Dengan konfigurasi tersebut, diperoleh hasil perbandingan sistem kontrol dengan Kalman Filter memberikan data sinyal sensor noise yang lebih kecil dibandingkan tanpa Kalman Filter. Analisis nilai selisih noise sistem kontrol menunjukkan optimalisasi yang terjadi sebesar 97,3%. Selanjutnya, proses evaluasi juga ditinjau dengan melihat pengoptimalan performansi sistem kontrol, antara variabel sudut bukaan throttle dengan rpm turut dilakukan. Hasil yang ditunjukkan berupa Mean Absolute Error (MAE) pada sistem penggerak *electric* sebesar 80,5% dan sistem penggerak *gasoline-engine* mencapai 88,9%. Secara keseluruhan, nilai-nilai optimasi yang ditunjukkan melebihi threshold 80% sehingga algoritma ini layak diterapkan. Dengan demikian, algoritma Kalman Filter dapat dijadikan sebagai optimasi sistem kontrol dalam pengaturan kendaraan sepeda motor *electric hybrid*.

Kata Kunci: Sepeda Motor *Electric Hybrid*, Sistem Kontrol, Kalman Filter, MAE.

## Abstract

Control system presents a significant challenge in maintaining of *electric hybrid* uses, particularly during *electric* and *gasoline* switching. Specifically, the problem of this lies in the noise on potentiometer sensor, which imitates the throttle angle. Therefore, it is necessary to design a control system that reduces potentiometer sensor noise for optimization. This control system design is accomplished by implementing Kalman Filter algorithm in control system. Kalman Filter algorithm is directly deployed and made through the Arduino IDE (C++ programming language basis). To evaluate the control system design, a comparison between control systems with and without the Kalman Filter algorithm is carried out on Suzuki Spin 125 with added *electric* modifications, such as a 60 Volt/1000 Watt brushless direct current (BLDC) motor, a 60 Voltage/14,7 Ah Lithium-ion battery, and an Arduino Mega2650 and STM32 board. The comparison results show the control system with Kalman Filter gives smaller sensor noise signal data compared to the system without Kalman Filter. The control system noise difference analysis values indicates optimization by 97.3%. Furthermore, the evaluation process includes optimizing control system performance between the throttle opening angle variable and rpm. The results show Mean Absolute Error (MAE) of 80.5% for *electric* system and 88.9% for *gasoline-engine* system. Overall, optimization values exceed the 80%, indicating algorithm is worthy of implementation. In conclusion, Kalman Filter algorithm can be utilized as an control system optimization regulating *electric hybrid* motorcycle. This approach holds great potential of energy management and reducing sensor noise, thereby contributing to the efficient operation of *electric hybrid* vehicle.

Keywords: Hybrid *Electric Motorcycle*, System Control, Kalman Filter, MAE.

## 1. Pendahuluan

Jumlah penggunaan sepeda motor di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 143,8 juta unit, jumlah tersebut meningkat dari tahun sebelumnya sebesar 136,1 juta unit atau peningkatan sebesar 5,7% [1]. Peningkatan disebabkan oleh permintaan akan kendaraan roda dua yang dianggap sebagai transportasi yang efisien dan efektif untuk membantu aktivitas manusia setiap harinya.

Sehubungan dengan meningkatnya penggunaan kendaraan roda dua membuat melonjaknya angka penggunaan bahan bakar minyak (BBM) setiap tahunnya. Per Januari 2021, produksi minyak bumi Indonesia sebesar 686.000 barel per harinya,

sedangkan total kebutuhan konsumsi minyak bumi per hari sebesar 1.392.000 barel [2]. Peningkatan ini menyebabkan penurunan kualitas udara akibat polusi dari emisi gas buang hasil pembakaran mesin kendaraan roda dua mencapai 65-85% [3]. Hasil gas buang pada kendaraan secara teoritis mengandung karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) merupakan unsur yang sangat berbahaya bagi kesehatan, semakin tinggi konsentrasi unsur senyawa tersebut terhirup maka dapat menyebabkan risiko fatal hingga kematian [4].

Dewasa ini, berbagai inovasi yang mengembangkan kendaraan alternatif sebagai pengganti kendaraan roda dua *gasoline-engine*

dilakukan. Kendaraan *electric* menjadi pilihan dikarenakan tidak menghasilkan emisi gas buang, membutuhkan biaya operasional yang rendah dan perawatan lebih sedikit. Namun, beberapa ketidaknyamanan dalam penggunaan kendaraan *electric* seperti, jumlah stasiun pengisian energi terbatas, waktu pengisian ulang energi yang sangat lama, jarak tempuh yang lebih rendah daripada kendaraan *gasoline* [5]. Selain itu, kemacetan menjadi faktor yang dapat merugikan karena terjadi peningkatan jumlah konsumsi energi dan secara signifikan mempengaruhi batas jarak tempuh oleh kendaraan *electric* [6].

Belum efektifnya inovasi dapat diatasi dengan pengoptimalan sumber energi alternatif oleh sistem penggerak *Hybrid Electric Vehicle* (HEVs). Kendaraan *electric hybrid* mengintegrasikan *gasoline-engine* dengan motor *electric* dan baterai secara efektif, memanfaatkan sumber konsumsi sepenuhnya membuat jarak tempuh mengemudi yang lebih jauh dari kendaraan *gasoline-engine*, tetapi memiliki efisiensi tinggi dalam penghematan energi kendaraan *electric* [7]. Namun, penerapan sistem *Hybrid Electric Vehicle* pada kendaraan roda dua masih terdapat permasalahan dalam kinerja sistem *controller* antara sumber daya *gasoline-engine* dengan motor *electric*. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu penunjang pada sistem *controller* yang dapat menambah performansi respon pada pengaturan *controller*, sehingga mencapai keakuratan dan kestabilan sistem yang sesuai diharapkan.

Berangkat dari permasalahan, diajukan algoritma kontrol menggunakan Kalman *Filter* sebagai penerapan untuk menstabilkan *output* data. Untuk memvalidasi efektivitas penerapan algoritma Kalman *Filter* pada sistem *controller*, rancangan ini diusulkan sebagai pengembangan metode eksperimental dengan *microcontroller* pada kendaraan roda dua *electric hybrid*.

## 2. Dasar Teori

Kalman *Filter* berfungsi untuk mengurangi kuadrat kesalahan diperkirakan pada linier stokastik dengan menerapkan sensor *noise*. Hal ini, berpengaruh untuk meminimalkan peranan kuadrat kesalahan yang diperkirakan pada sistem dinamis oleh gangguan *noise* dan pengukuran. Sehingga, berfungsi untuk mengkaji kinerja dari sistem dan dapat memprediksi suatu kondisi pada sistem dinamis.

Kalman *Filter* terdiri dari dua bagian, yakni prediksi dan pembaruan [8]. Berikut persamaan dari Kalman *Filter* yang ditunjukkan pada (1)-(5)

### Bagian Prediksi:

$$\hat{x}_{t|t-1} = F_t \hat{x}_{t-1|t-1} + B_t u_t \quad (1)$$

$$P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t \quad (2)$$

### Bagian Update:

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t (y_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}) \quad (3)$$

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (4)$$

$$P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1} \quad (5)$$

Keterangan:

$x$	: Perkiraan kondisi
$F$	: Matriks kondisi
$u$	: Variabel kontrol
$B$	: Matriks kontrol
$P$	: Matriks varians kondisi
$Q$	: Matriks varians proses
$y$	: Variabel pengukuran
$H$	: Matriks pengukuran
$K$	: Gain Kalman
$R$	: Matriks pengukuran
$t t$	: Periode waktu sekarang
$t-1 t-1$	: Periode waktu sebelumnya
$t t-1$	: Tahap peralihan

Persamaan (1) – (5) merupakan model Kalman *Filter* yang tujuannya belum ditentukan. Maka pengaplikasian algoritma Kalman *Filter* dengan tujuan untuk minimalisasi *noise* dari *reading* sensor, dibutuhkan beberapa variasi adaptasi kondisi, sehingga didapatkan penyesuaian sebagai berikut:

#### 1. Memperkirakan kondisi

Adaptasi yang dilakukan pada persamaan (1) dengan memberikan nilai  $F_t = 1$  karena tanpa adanya proses transisi pada kondisi. Hal ini membuat sistem yang digunakan tidak mempunyai *input* akibat mengurangi komponen dari *input* sistem. Persamaan dilakukan tahap penyesuaian agar memperoleh tujuan yang ditunjukkan pada (6).

$$x_{t|t-1} = x_{t-1|t-1} \quad (6)$$

#### 2. Memperkirakan kesalahan

Dari  $F_t = 1$ , maka persamaan (1) menjadi (7).

$$P_{t-1} = P_{t-1|t-1} + Q_t \quad (7)$$

#### 3. Memperbarui nilai status

Dari persamaan (3), data sensor dilakukan tahap *filter* yang hanya melibatkan satu pembacaan sensor, karena  $H_t = 1$ . Dengan demikian, persamaan (8) yang didapat sebagai berikut:

$$x_{t|t} = x_{t|t-1} + K_t (y_t - x_{t|t-1}) \quad (8)$$

#### 4. Kalkulasi Kalman *Gain*

Dari  $H_t = 1$ , maka persamaan (4) menjadi (9).

$$K_t = P_{t|t-1} (P_{t|t-1} + R)^{-1} \quad (9)$$

#### 5. Memperbarui nilai *error*

Dari  $H_t = 1$ , maka persamaan (1) akan diganti menjadi (5)

$$P_{t|t} = (1 - K_t) P_{t|t-1} \quad (10)$$

Setelah tahap penyesuaian, maka didapatkan persamaan algoritma Kalman *Filter* sebagai minimalisasi *noise* dari pembacaan sensor sebagai berikut:

### Bagian Prediksi:

$$x_{t|t-1} = x_{t-1|t-1} \quad (11)$$

$$P_{t-1} = P_{t-1|t-1} + Q_t \quad (12)$$

Bagian *Update*:

$$x_{t|t} = x_{t|t-1} + K_t(y_t - x_{t|t-1}) \quad (13)$$

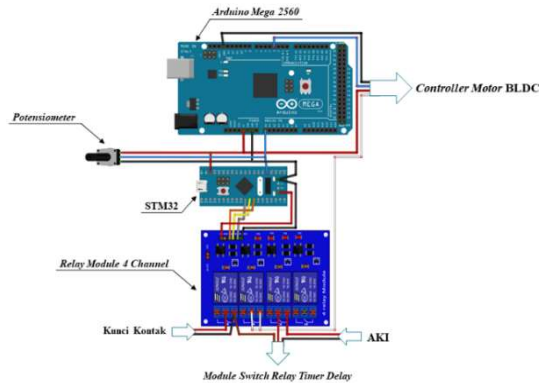
$$K_t = P_{t|t-1}(P_{t|t-1} + R)^{-1} \quad (14)$$

$$P_{t|t} = (1 - K_t)P_{t|t-1} \quad (15)$$

### 3. Metode Penelitian

Dalam strategi manajemen energi, mode *electric hybrid* hanya menggunakan putaran potensiometer, sebagai *throttle*, dengan batas nilai 20 dari totalnya putaran *throttle* 60. *Throttle* pada sepeda motor terintegrasi dengan sensor potensiometer yang menyebabkan kedua komponen tersebut beroperasi secara bersama.

Dalam konteks instalasi (Gambar 1) dan skema rancangan (Gambar 2), potensiometer memiliki tiga *pin* yang terhubung pada *Arduino Mega 2560*. Ketiga *pin* tersebut tersambung dengan *pin power 5V*, *ground*, dan *analog in (A0)*, sehingga *Arduino Mega 2560* dapat membaca *output* sinyal dari *potensiometer*. *Arduino Mega 2560* diprogram untuk menghasilkan *output* data penentuan kecepatan terhadap sistem penggerak *electric*. Kemudian *pin ground*, *PWM 3*, dan *power 5V* berfungsi untuk mendistribusikan data penentuan kecepatan menuju *controller motor BLDC*. *Output* data yang diterima akan melewati proses pengolahan data pada *controller motor BLDC*, sehingga memperoleh *output* data untuk mengoperasikan *Motor BLDC*.

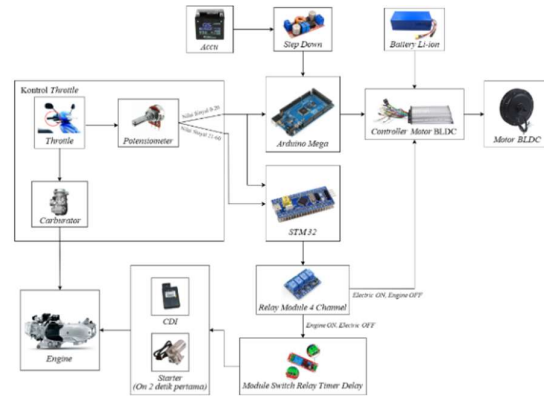


Gambar 1. Instalasi sistem kontrol *electric hybrid*.

Ketiga *pin* potensiometer juga terhubung dengan *pin 3.3*, *A0*, dan *ground* pada *STM 32*. Keluaran sinyal potensiometer didistribusikan menuju *STM32*, proses ini dapat mengontrol perpindahan sumber daya *electric* ke *gasoline-engine* atau sebaliknya. Parameter perpindahan sumber daya ditentukan oleh nilai sinyal dari sensor potensiometer. Selanjutnya *pin 3.3*, *ground*, *B3*, *B4*, serta *B5* pada *STM32* terhubung dengan *pin VCC*, *ground*, *IN1*, *IN2*, dan *IN3* yang berada di *Relay Module 4 Channel*. *STM32* mengirimkan *output* data untuk memerintahkan *Relay*

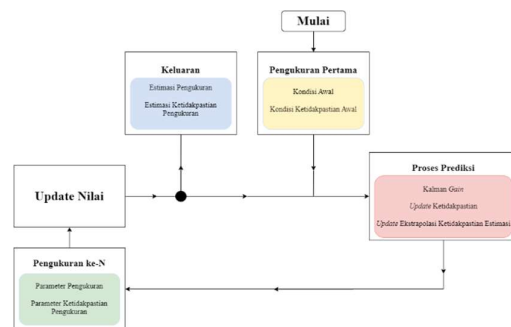
*Module 4 Channel* dalam menggerakkan pensaklaran peralihan sumber daya.

Ketika sudut bukaan *throttle* dengan nilai sinyal berada antara 0-20, *relay* sistem penggerak *electric* terhubung dan secara impulsif *terminal block channel 3 (K3)* pada *Relay Module 4 Channel* mengirimkan sinyal menuju *controller motor BLDC*. Dengan demikian, *Motor BLDC* beroperasi sebagai penggerak utama dalam menjalankan sepeda motor *electric hybrid*. Sedangkan saat putaran *potensiometer* berada diatas nilai sinyal 20, *relay* sistem penggerak *gasoline-engine* dalam kondisi terhubung. Hal ini, *Terminal block channel 2 (K2)* memberi sinyal menuju *Module Switch Relay Timer Delay* untuk melakukan *starter* awal selama dua detik dengan sumber energi yang berasal dari aki. Keadaan ini mengaktifkan *engine* sebagai sistem penggerak utama dalam menjalankan sepeda motor *electric hybrid*.



Gambar 2. Skema rangkaian sistem kontrol sepeda motor *electric hybrid*.

Pemrograman dirangkai pada *software* *Arduino IDE (Integrated Development Environment)* melalui *source code* yang mampu membuat sistem kontrol beroperasi sesuai skema (Gambar 1) dengan terintegrasi berbasis *Kalman Filter*. Pada sistem estimasi *Kalman Filter* dibagi menjadi dua bagian, yaitu prediksi dan *update* (Gambar 2). Bagian prediksi beroperasi terhadap sistem yang menggunakan hasil prediksi dari keadaan sistem waktu sebelumnya untuk digunakan dalam memprediksi keadaan saat ini. Sedangkan bagian *update* adalah data yang diperoleh dari sebelumnya digunakan dalam memprediksi hasil dengan diperoleh saat keadaan sekarang.



Gambar 3. Proses Algoritma *Kalman Filter*.

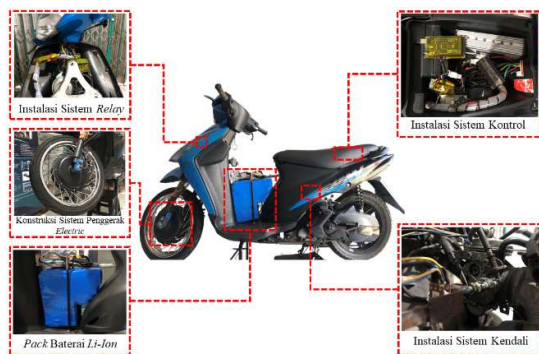
Dalam mendeteksi ketepatan serta akurasi dari hasil prediksi, ada beberapa kriteria terhadap pemilihan model terbaik dengan didasarkan oleh nilai *error* yang rendah. Namun saat nilai *error* tinggi, maka akurasi peramalan yang dilakukan belum akurat. Sebagai analisis kuantitatif, penerapan *Mean Absolute Error (MAE)* dilakukan dengan model hasil regresi polinomial sebagai pembanding tetap. Kajian penggunaan model ini dilandasi oleh pendekatan yang paling memungkinkan untuk diterapkan karena tidak adanya persamaan eksplisit yang menggambarkan hubungan kedua variabel (sudut bukaan *throttle* dan *RPM*). Secara intuitif, *MAE* mampu merepresentasikan *noise* untuk data *non-linear*.

Tahap pengujian menggunakan model komparatif dua *sample* untuk menentukan antara sistem kontrol tanpa dan dengan *Kalman Filter* terdapat perbedaan atau memperoleh penerapan yang satu lebih baik dari penerapan lainnya.

## 4. Hasil dan Pembahasan

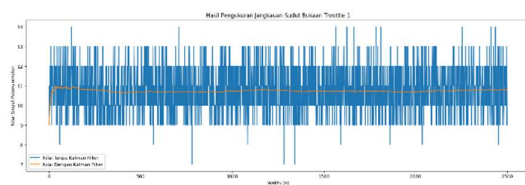
### 4.1 Hasil Rancangan

Berdasarkan rancangan, sistem kontrol kendaraan *electric hybrid* diimplementasikan pada sepeda motor *matic* Spin 125 Suzuki (Gambar 4).



Gambar 4. Hasil rancangan sistem kontrol sepeda motor *electric hybrid*.

Sistem kontrol berfungsi dalam mengatur beberapa sistem perangkat untuk menghasilkan strategi manajemen energi antara sistem penggerak *electric* dengan sistem penggerak *gasoline-engine*. Dalam penerapannya, konfigurasi *electric hybrid* pada sepeda motor *matic* Spin 125 Suzuki menggunakan jenis konfigurasi *parallel* sehingga aliran daya dari sumber energi dapat bekerja secara bersama atau terpisah.



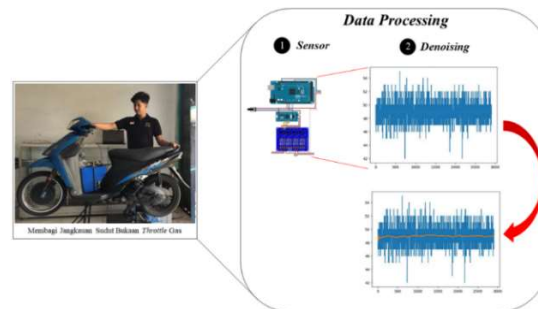
(a)

Uji fungsionalitas dengan mengobservasi sistem kontrol dapat berjalan atau tidak sesuai dengan perancangan telah dilakukan. Merujuk terkait hasil, sistem kontrol mampu berjalan sesuai rancangan secara menyeluruh pada sistem penggerak *gasoline-engine* dan *electric* dengan melakukan peralihan antara kedua sistem penggerak tersebut. Namun, melihat dari hasil pembacaan sensor potensiometer sepeda motor *electric hybrid*, sensor masih menunjukkan adanya fluktuasi nilai sudut *throttle* pada sudut bukaan yang sama. Oleh karena itu, fluktuasi ini diminimalisasi dengan algoritma *Kalman Filter* sehingga kestabilan *output* data yang dihasilkan lebih optimal.

## 4.2 Pengujian Sistem Kontrol Sepeda Motor *Electric Hybrid* Berbasis *Kalman Filter*

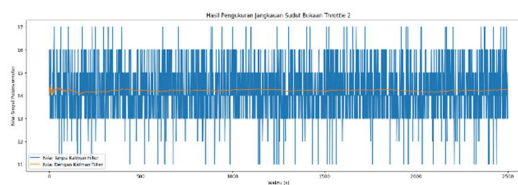
### 4.2.1 Fungsionalitas Sensor Potensiometer

Proses variasi putaran *throttle* dilakukan secara berurutan dengan membagi jangkauan sudut bukaan *throttle* yang dimulai dari sudut terkecil hingga mencapai terbesar. Dengan cara ini, sudut bukaan *throttle* diperoleh dalam sembilan bagian yang memiliki nilai sinyal berbeda pada setiap pengambilannya.

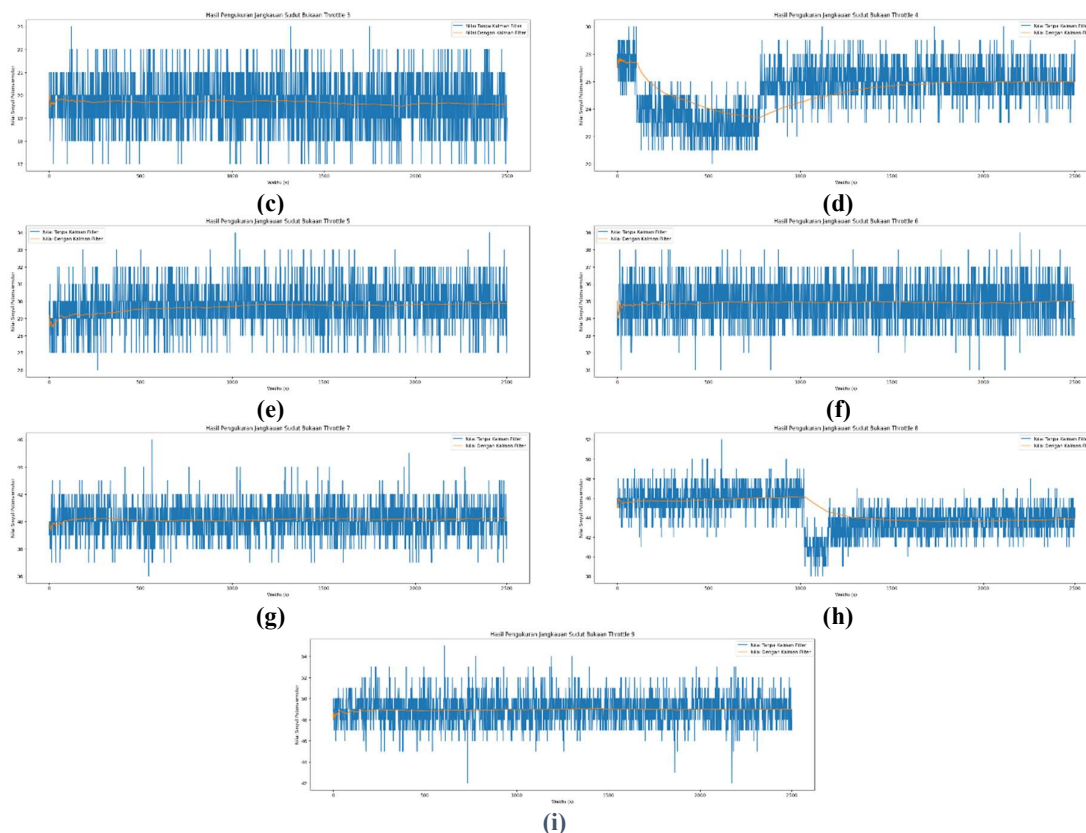


Gambar 5. Skema pengukuran nilai sinyal sensor potensiometer dari sudut bukaan *throttle*.

Nilai sinyal sensor potensiometer pada sistem kontrol melewati proses *denoising* dengan menggunakan *Kalman Filter*. *Noise* dapat terjadi selama akuisisi nilai sinyal pada sensor sehingga proses *denoising* diterapkan untuk mendapatkan nilai sinyal dari sensor yang lebih valid. Algoritma *filter* memiliki kemampuan dalam *denoising* data *real-time* dengan baik. Secara sederhana, *Kalman Filter* melakukan proses iterasi guna memperbaharui prediksi di setiap iterasi. Sebagai hasil pengukuran dari nilai sinyal sensor potensiometer divisualisasikan pada Gambar 6.



(b)



Gambar 6. Hasil pengukuran jangkauan sudut bukaan *throttle* pada (a). variasi pertama, (b). variasi kedua, (c). variasi ketiga, (d). variasi keempat, (e). variasi kelima, (f). variasi keenam, (g). variasi ketujuh, (h). variasi kedelapan, dan (i). variasi kesembilan.

Gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan nilai sinyal potensiometer tanpa dan dengan Kalman *Filter* yang berturut-turut ditandai oleh warna biru dan jingga. Grafik menjelaskan bahwa kinerja sensor tidak konsisten dalam memprediksi suatu nilai (pada posisi *throttle* yang sama) sebelum diterapkan Kalman *Filter*. Setelah penerapan Kalman *Filter*, sinyal secara langsung menunjukkan adanya pembaharuan nilai berupa reduksi *noise* pada posisi *throttle* yang sama. Dengan demikian, interpretasi data sudut bukaan *throttle* yang dihasilkan sinyal sensor akan lebih baik dan lebih stabil. Secara spesifik, Gambar 6. (a), (b), (c), (e), (f), (g), (i), dengan penuh memberikan grafik nilai yang cenderung konstan pada sudut bukaan *throttle* yang sama. Gambar 6. (d) dan (h) menunjukkan adanya kecenderungan perubahan nilai yang terjadi pada sudut bukaan *throttle* yang sama. Terlepas dari hal tersebut, prediksi oleh Kalman *Filter* tetap dapat memberikan prediksi mengikuti tren perubahan kecenderungan nilai yang terjadi. Secara komprehensif, algoritma ini dapat dikatakan menjadi reduktor *noise* yang baik dalam kondisi sensor potensiometer pada sepeda motor *electric hybrid*.

Mendukung hasil pengamatan grafik komparasi, perbandingan standar deviasi antara pengukuran sinyal potensiometer tanpa dan dengan Kalman *Filter* turut dilakukan. Secara intuitif, penggunaan standar

deviasi dilakukan dengan dasar *metrics* yang mampu memberikan sebaran data sehingga dapat merepresentasikan *noise* pada satu pengukuran yang sama. Penghimpunan data standar deviasi tanpa dan dengan Kalman *Filter*, serta optimalisasi yang terjadi di setiap pengukuran dilakukan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengamatan *noise* pengukuran jangkauan sudut bukaan *throttle*.

Sudut Bukaan <i>Throttle</i> Variasi Ke-N	Standar Deviasi Tanpa Kalman <i>Filter</i>	Standar Deviasi Dengan Kalman <i>Filter</i>	Optimalisasi Reduksi <i>Noise</i> (%)
1	1,204	0,579	51,9
2	1,181	0,031	97,3
3	1,168	0,087	92,5
4	1,185	0,813	31,4
5	1,225	0,226	81,5
6	1,251	0,040	96,8
7	1,212	0,047	96,1
8	1,972	1,019	48,3
9	1,415	0,135	90,4

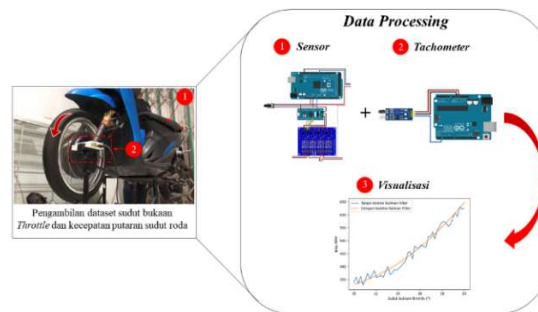
Dari sembilan pengukuran yang dilakukan, terdapat dua pengukuran yang dieksklusi dalam

analisis komparasi karena tidak menunjukkan tren yang konstan, yaitu pada pengukuran keempat dan kedelapan. Rentangan nilai *noise* di data sistem kontrol tanpa Kalman *Filter* dan berbasis Kalman *Filter* berturut-turut menunjukkan nilai 1,168-1,415 dan 0,031-0,579. Optimalisasi yang terjadi memiliki rentangan 51,9% - 97,3%. Secara garis besar, algoritma Kalman *Filter* memberikan optimalisasi melebihi nilai *threshold* 80%, yang mengindikasikan algoritma sistem kontrol yang baik untuk diimplementasikan [9].

#### 4.2.2 Perbandingan Kecepatan Sudut Putaran Roda pada Sistem Kontrol Tanpa dan Dengan Kalman *Filter*.

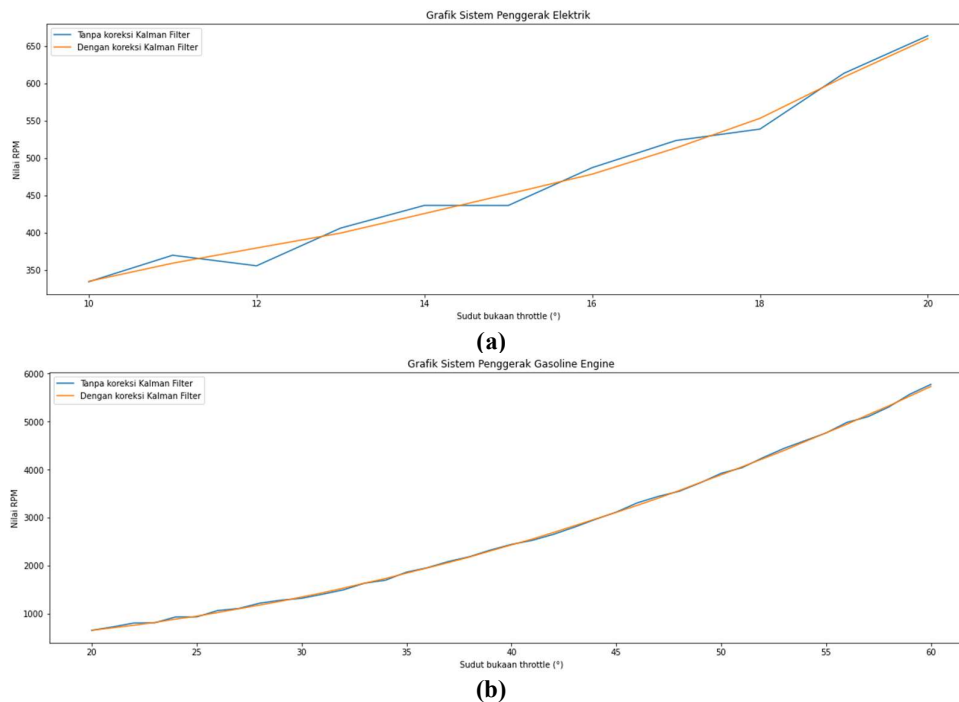
Pengukuran kecepatan putaran sudut roda setiap sistem penggerak dilakukan dengan menggunakan *Tachometer*. Pengukuran putaran sudut roda dilaksanakan mulai dari kecepatan terendah hingga tertinggi yang dikontrol oleh pengguna melalui putaran *throttle*. Secara khusus, *Tachometer* dirancang menggunakan *microcontroller* Arduino Uno dengan dilengkapi *Infrared* sensor. Beriringan tahapan tersebut, pengukuran juga diperoleh melalui sistem kontrol dengan sensor *potensiometer*. Tahapan

pengukuran sudut bukaan *throttle* dan kecepatan putaran sudut roda diilustrasikan pada gambar 7.



Gambar 7. Skema pengukuran dengan sistem kontrol terintegrasi berbasis Kalman *Filter*.

Observasi melalui grafik dilakukan untuk melihat koreksi yang dihasilkan oleh algoritma Kalman *Filter* terhadap hubungan *output* data sistem kontrol (nilai sinyal) dengan kecepatan sepeda motor *electric hybrid*. Secara intuitif, perolehan hasil mampu mengindikasikan pengaruh terhadap peningkatan performa sistem kontrol. Visualisasi grafik hasil pengukuran ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 7. Grafik hasil data sudut bukaan *throttle* dan kecepatan putaran sudut roda pada (a). sistem penggerak *electric* dan (b). sistem penggerak *gasoline-engine*.

Observasi dapat dilakukan berdasarkan penurunan *noise* yang terjadi pada kondisi sistem kontrol tanpa Kalman *Filter* serta berbasis Kalman *Filter*. Namun, adanya batasan terhadap pengukuran yang terjadi. Observasi tidak dapat diterapkan pada saat pengukuran sudut bukaan *throttle* dengan nilai

sinyal 0-9 dikarenakan rentangan nilai tersebut relatif sulit untuk direkam. Dengan demikian, proses pengukuran hanya dilakukan di rentang nilai sinyal potensiometer 10-20 untuk penggerak *electric* dan 21-60 untuk penggerak *gasoline-engine*, dengan nilai sinyal 60 merupakan batas atas dari sudut bukaan

*throttle*. Sebagai hasil visualisasi, grafik pada Gambar 9. (a) dan (b) menunjukkan hubungan sudut bukaan *throttle* dan RPM pada penggerak *electric* dan *gasoline-engine*. Secara intuitif, reduksi *noise* terjadi dari penurunan fluktuatif di grafik tersebut.

Pada penggerak *electric*, sistem kontrol tanpa Kalman *Filter* memperoleh nilai *MAE* sebesar 110,22302055747917. Hasil ini relatif tinggi apabila dibandingkan dengan nilai *MAE* sistem kontrol berbasis Kalman *Filter* yang mendapatkan nilai 21,472483931861518. Secara langsung, kemampuan Kalman *Filter* dalam mereduksi *noise* memberikan akurasi kontrol yang lebih optimal. Hal ini didukung oleh validasi efektivitas penerapan Kalman *Filter* yang menunjukkan pengoptimalan performa sistem kontrol mencapai 80,5%. Pada penggerak *gasoline-engine*, sistem kontrol tanpa Kalman *Filter* memberikan nilai *MAE* sebesar 1016,6124143510335. Setelah penerapan Kalman *Filter*, sistem kontrol memberikan nilai *MAE* yang relatif lebih rendah, yakni sebesar 112,81633294137714. Pengoptimalan performansi sistem kontrol penggerak *gasoline-engine* berhasil mencapai 88,9%.

Secara keseluruhan, berhasilnya pendekatan estimasi nilai sinyal terhadap kecepatan putaran sudut roda membuktikan kinerja sistem kontrol berbasis Kalman *Filter* berjalan dengan baik dalam menyesuaikan strategi kontrol yang berdampak pada peningkatan performa kendaraan. Dengan demikian, sistem kontrol berbasis Kalman *Filter* efisien dalam peningkatan potensi kestabilan nilai sinyal melalui proses minimalisasi *statistical noise*.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah dijabarkan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem kontrol kendaraan *electric hybrid* roda dua dikembangkan melalui metode eksperimental sebagai dasar penilaian efektivitas penerapan. Observasi terhadap uji fungsionalitas menunjukkan sistem kontrol mampu beroperasi sesuai rancangan secara menyeluruh pada sistem penggerak *gasoline-engine* dan *electric*. Didukung dengan peralihan sistem penggerak yang bersesuaian terhadap ketentuan parameter.
2. Meninjau sistem kontrol berbasis Kalman *Filter*, perolehan hasil memperlihatkan peningkatan kemampuan akurasi dalam stabilitas penyampaian nilai sinyal menjadi lebih optimal. Hasil estimasi pembaharuan nilai sinyal tersebut berkaitan terhadap *statistical noise* sensor yang telah berhasil di minimalisasi dengan tahapan rekursif dari pembentukan koreksi nilai sebelumnya. Hasil yang ditunjukkan berupa *Mean Absolute Error (MAE)* pada sistem penggerak *electric* sebesar 80,5% dan sistem penggerak *gasoline-engine* mencapai 88,9%. Secara keseluruhan, nilai-nilai optimasi yang ditunjukkan melebihi *threshold* 80% sehingga algoritma ini layak diterapkan.

## Daftar Pustaka

- [1] “Badan Pusat Statistik.”

<https://www.bps.go.id/indicator/17/57/1/jumlah-kendaraan-bermotor.html> (accessed Apr. 07, 2023).

- [2] D. M. Yulanto *et al.*, “Studi analisis perkembangan teknologi kendaraan listrik hibrida,” vol. 02, no. 1, pp. 31–44, 2021.
- [3] J. Al Harier, F. Herlina, and Jainal Arifin, “Bahan Bakar Terhadap Emisi Gas Buang Motor Matik Injeksi,” *J. Univ. Islam Kalimantan MAB*, pp. 0–7, 2022.
- [4] S. Machmud, “Analisis Pengaruh Tahun Perakitan Terhadap Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor,” *J. Mesin Nusant.*, vol. 4, no. 1, pp. 21–29, 2021, doi: 10.29407/jmn.v4i1.16038.
- [5] H. Mao, J. Shi, Y. Zhou, and G. Zhang, “The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Multiple Recharging Options,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 114864–114875, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003000.
- [6] J. Lu, Y. Chen, J. Hao, and R. He, “Expert Systems with Applications The Time-dependent Electric Vehicle Routing Problem : Model and solution,” vol. 161, 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113593.
- [7] Y. Zou *et al.*, “Modeling and energy management strategy research of a power-split hybrid electric vehicle,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 10, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1177/1687814020962624.
- [8] A. Ma’arif, I. Iswanto, A. A. Nuryono, and R. I. Alfian, “Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings,” *Signal Image Process. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 11–22, 2019, doi: 10.31763/simple.v1i2.2.
- [9] S. R. Hosmer DW Jr, Lemeshow S, *Applied logistic regression.*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2013., 2022.



**I Nyoman Bima Permana** menyelesaikan studi program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2019 sampai 2023. Bidang penelitian yang diminati adalah sistem kendali otomatis dengan konsentrasi Rekayasa Manufaktur.