

Filter Hibrida H_∞ -Kalman Berbasis Riccati Terpadu untuk Sistem Waktu Kontinu dengan Jaminan Horizon Semi-Tak hingga

Budi Rudianto^{1*)}, Nada Fauziah²

¹Departemen Matematika dan Sains Data Universitas Andalas

²Departemen Ilmu Lingkungan, Sekolah Pasca Sarjana Universitas Andalas

INFO ARTICLES

Key Words:

Kalman robust Filter; H_∞ Estimation; continuous-time systems; Riccati equation; semi-infinite horizons



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Abstract: This paper proposes a unified Riccati-based hybrid H_∞ -Kalman filter for robust state estimation of continuous-time systems subject to parametric uncertainties and mixed disturbances over semi-infinite horizons. The approach integrates the stochastic optimality of the Kalman filter with the worst-case performance guarantee of H_∞ filtering through a single Riccati equation framework. Stability and robustness are ensured via Lyapunov theory and linear matrix inequalities, guaranteeing asymptotic convergence of the estimation error and input-to-state stability. Numerical simulations on a second-order system demonstrate that the hybrid filter reduces the root mean square error by 18% compared to the pure H_∞ filter and improves the H_∞ norm margin by 25% over the standard Kalman filter, with faster convergence. These results validate the effectiveness of the proposed filter in simultaneously achieving estimation accuracy and deterministic robustness under model imperfections.

Abstrak: Penelitian ini mengusulkan filter hibrida H_∞ -Kalman berbasis Riccati terpadu untuk estimasi state yang robust pada sistem waktu kontinu dengan ketidakpastian parametrik dan gangguan campuran dalam horizon semi-tak hingga. Metode ini mengintegrasikan optimalitas stokastik dari filter Kalman dengan jaminan kinerja terburuk dari pendekatan H_∞ melalui sebuah persamaan Riccati tunggal. Analisis stabilitas menggunakan fungsi Lyapunov dan ketaksamaan matriks linear menjamin konvergensi asimtotik error estimasi dan stabilitas input-to-state. Simulasi numerik pada sistem orde dua menunjukkan bahwa filter hibrida mengurangi RMSE sebesar 18% dibandingkan filter H_∞ murni dan meningkatkan margin norm H_∞ sebesar 25% dibandingkan filter Kalman standar, dengan waktu konvergensi yang lebih cepat. Hasil ini memvalidasi efektivitas filter yang diusulkan dalam mencapai akurasi estimasi dan ketangguhan secara bersamaan.

Correspondence Address: Jln. Kampus Unand Limau Manis, Kota Padang, Kode Pos 25137, Indonesia; e-mail: budirudianto@sci.unand.ac.id

How to Cite (APA 6th Style): Rudianto, B., & Fauziah, N. (2026). Filter Hibrida H_∞ -Kalman Berbasis Riccati Terpadu untuk Sistem Waktu Kontinu dengan Jaminan Horizon Semi-Tak hingga. *Prosiding Diskusi Panel Nasional Pendidikan Matematika*, 481-492.

Copyright: Budi Rudianto & Nada Fauziah, (2026)

PENDAHULUAN

Estimasi keadaan merupakan komponen fundamental dalam analisis dan pengendalian sistem dinamis waktu-kontinu, khususnya pada sistem yang mengandung ketidakpastian dan gangguan eksternal (Chen & Tu, 2022; Fang et al., 2022; Naya et al., 2023; Rudianto et al., 2025b). Dalam berbagai aplikasi rekayasa dan sains terapan, ketersediaan informasi keadaan yang akurat menjadi prasyarat utama untuk menjamin kinerja sistem secara stabil dan andal (Ding & Dong, 2021; Qi & Wang, 2022). Salah satu metode estimasi yang paling banyak digunakan adalah *Kalman Filter*, yang secara optimal meminimalkan galat estimasi di bawah asumsi gangguan Gaussian dan model sistem yang diketahui secara tepat (Armbruster et al., 2022; Fauziah et al., 2025; Guo et al., 2021; Rudianto et al., 2025a). Namun, dalam praktiknya, asumsi tersebut sering kali tidak terpenuhi, sehingga kinerja Kalman Filter klasik dapat menurun secara signifikan ketika sistem menghadapi ketidakpastian model, gangguan non-Gaussian, atau perubahan dinamika jangka panjang (Huang & Zhang, 2022; Pavlović et al., 2023; Uduma & Uduma, 2025).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pendekatan H_∞ filtering telah dikembangkan sebagai alternatif yang menekankan ketahanan (*robustness*) terhadap gangguan terburuk tanpa bergantung pada asumsi statistik tertentu (Claver et al., 2023; Guo et al., 2021; Nakamori, 2023; Rudianto et al., 2025b). Pendekatan ini memberikan jaminan batas atas energi galat estimasi melalui formulasi optimisasi minimaks (Qi & Wang, 2022; Yi & Zorzi, 2022). Meskipun demikian, filter H_∞ cenderung bersifat konservatif dan kurang responsif terhadap informasi statistik pengukuran, terutama pada kondisi data yang relatif bersih. Oleh karena itu, dalam beberapa tahun terakhir, perhatian penelitian beralih pada pengembangan *filter hibrida* yang mengombinasikan keunggulan Kalman Filter dan filter H_∞ untuk memperoleh estimasi yang sekaligus optimal secara statistik dan robust terhadap ketidakpastian (Assimakis et al., 2021; Gadsden & Habibi, 2013).

Sejumlah penelitian mutakhir telah mengusulkan berbagai skema *robust Kalman filtering* dan *distributionally robust filtering* dengan memodifikasi struktur kovarians, fungsi biaya, maupun asumsi distribusi gangguan (Chen & Tu, 2022; Guo et al., 2021; Rudianto et al., 2025b; Ruiz-Garzón et al., 2023). Pendekatan-pendekatan tersebut menunjukkan peningkatan kinerja estimasi pada sistem diskrit maupun waktu-kontinu dengan gangguan berat ekor (*heavy-tailed noise*) dan ketidakpastian model (Fang et al., 2022; Li et al., 2022). Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada horizon waktu hingga atau takhingga klasik, tanpa membahas secara eksplisit karakteristik horizon semi-takhingga yang relevan pada sistem yang beroperasi dalam jangka panjang dengan fase transien awal yang krusial (Cheban & Liu, 2021; Rauh & Kersten, 2021).

Di sisi lain, kerangka Riccati diferensial memainkan peran sentral dalam desain filter dan kontrol optimal waktu-kontinu (Fadhel & Altaie, 2021; Rudianto et al., 2025a). Persamaan Riccati menyediakan alat analitis untuk menjamin stabilitas dan konvergensi estimasi, baik dalam konteks Kalman Filter maupun filter H_∞ . Meskipun demikian, kajian yang mengintegrasikan secara terpadu Riccati Kalman dan Riccati H_∞ dalam satu kerangka hibrida untuk horizon semi-takhingga masih relatif terbatas. Hal ini membuka peluang penelitian untuk merancang filter hibrida yang tidak hanya robust dan optimal, tetapi juga memiliki jaminan stabilitas jangka panjang yang jelas secara matematis.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan penelitian ini dirumuskan sebagai berikut: bagaimana merancang filter hibrida H_∞ -Kalman berbasis Riccati terpadu untuk sistem waktu-kontinu yang mengandung ketidakpastian, serta bagaimana menjamin kestabilan dan kinerja estimasi pada horizon waktu semi-takhingga. Sejalan dengan itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kerangka matematis filter hibrida yang menggabungkan optimalitas Kalman Filter dan robustnes filter H_∞ melalui formulasi Riccati diferensial, serta menganalisis sifat stabilitas dan konvergensi galat estimasinya.

Kebaruan penelitian ini terletak pada perumusan filter hibrida H_∞ -Kalman dalam kerangka Riccati terpadu untuk sistem waktu-kontinu dengan horizon semi-takhingga, yang secara eksplisit menjembatani pendekatan optimisasi kuadratik dan minimaks. Berbeda dengan penelitian

sebelumnya, pendekatan yang diusulkan tidak hanya menekankan aspek performa sesaat, tetapi juga memberikan jaminan kestabilan estimasi dalam jangka panjang melalui analisis Riccati dan batas energi galat.

Kontribusi penelitian ini meliputi: (1) pengembangan model matematis filter hibrida H_∞ -Kalman berbasis Riccati diferensial untuk sistem waktu-kontinu tak pasti; (2) analisis stabilitas dan konvergensi estimasi pada horizon semi-tak hingga; dan (3) penyediaan kerangka konseptual yang dapat dijadikan dasar pengembangan metode estimasi robust lanjutan pada sistem dinamis kompleks. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur mengenai estimasi robust serta memberikan landasan teoritis yang kuat bagi aplikasi filter hibrida pada sistem nyata.

Susunan artikel ini adalah sebagai berikut. Bagian kedua menyajikan perumusan model sistem dan dasar teori filter Kalman, filter H_∞ , serta persamaan Riccati yang relevan. Bagian ketiga membahas desain filter hibrida H_∞ -Kalman berbasis Riccati terpadu. Bagian keempat menyajikan analisis stabilitas dan jaminan kinerja pada horizon semi-tak hingga. Selanjutnya, bagian kelima memaparkan hasil simulasi numerik untuk memverifikasi efektivitas metode yang diusulkan. Artikel ini ditutup dengan kesimpulan dan arah penelitian lanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-teoretis berbasis pemodelan matematis dan simulasi numerik untuk merancang dan mengevaluasi kinerja *filter hibrida H_∞ -Kalman* pada sistem dinamis waktu-kontinu yang mengandung ketidakpastian. Fokus utama metode penelitian ini adalah pengembangan algoritma estimasi keadaan yang robust dengan jaminan kestabilan pada horizon waktu semi-tak hingga melalui kerangka persamaan Riccati terpadu (Rudianto et al., 2025a; Yi & Zorzi, 2022).

Model sistem yang diteliti direpresentasikan dalam bentuk sistem linier waktu-kontinu dengan gangguan sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bw(t), y(t) = Cx(t) + v(t),$$

di mana $x(t)$ menyatakan vektor keadaan sistem, $y(t)$ adalah sinyal pengukuran, sedangkan $w(t)$ dan $v(t)$ masing-masing merepresentasikan gangguan proses dan gangguan pengukuran yang bersifat energi-terbatas. Model ini dipilih karena merupakan representasi standar dalam kajian estimasi keadaan dan memungkinkan analisis kestabilan berbasis Riccati (Yi & Zorzi, 2022).

Subjek penelitian dalam konteks ini bukan individu manusia, melainkan model sistem dinamis beserta variasi parameter ketidakpastian dan gangguan. Populasi penelitian didefinisikan sebagai seluruh konfigurasi sistem yang memenuhi asumsi kestabilan dasar, sedangkan sampel penelitian dipilih menggunakan *purposive sampling* berbasis skenario gangguan nominal dan gangguan terburuk (*worst-case disturbance*), sebagaimana umum digunakan dalam studi H_∞ filtering (He et al., 2025; Nakamori, 2023).

Instrumen penelitian mencakup model matematis sistem, algoritma Kalman Filter, algoritma H_∞ filter, dan algoritma filter hibrida yang diusulkan. Validitas instrumen dijamin melalui kesesuaian formulasi matematis dengan teori sistem linier dan persamaan Riccati diferensial, sementara reliabilitasnya diuji melalui simulasi berulang pada berbagai kondisi awal dan tingkat gangguan untuk memastikan konsistensi kinerja estimasi.

Filter hibrida H_∞ -Kalman dirancang dengan mengombinasikan struktur optimal Kalman Filter dan kriteria robust H_∞ . Secara konseptual, desain ini dinyatakan melalui persamaan Riccati diferensial terpadu:

$$-\dot{P}(t) = A^T P(t) + P(t)A - P(t)C^T R^{-1} C P(t) + Q + \gamma^{-2} P(t) B B^T P(t),$$

dengan $P(t)$ menyatakan matriks kovarians galat estimasi, Q dan R matriks bobot, serta γ sebagai parameter tingkat robustnes. Persamaan ini menjadi inti metode yang menjembatani

optimalitas Kalman dan ketahanan H_∞ pada horizon semi-tak hingga (Rudianto et al., 2025a; Ruiz-Garzón et al., 2023).

Prosedur penelitian dimulai dengan penentuan parameter sistem dan gangguan, dilanjutkan dengan penyelesaian numerik persamaan Riccati terpadu untuk memperoleh gain filter. Selanjutnya, estimasi keadaan dihitung menggunakan hukum estimasi:

$$\hat{x}(t) = A\hat{x}(t) + K(t)(y(t) - C\hat{x}(t)),$$

di mana $K(t)$ merupakan gain filter yang diturunkan dari solusi Riccati. Prosedur ini diulang untuk filter Kalman dan filter H_∞ sebagai pembandingan.

Analisis data dilakukan secara deterministik dengan mengevaluasi norma galat estimasi $\|x(t) - \hat{x}(t)\|$ dan energi galat sepanjang waktu. Pendekatan ini menggantikan uji statistik inferensial dan lazim digunakan dalam analisis estimasi robust karena memberikan jaminan kinerja berbasis batas energi (*energy-bounded analysis*) (Zhang & Zhang, 2021).

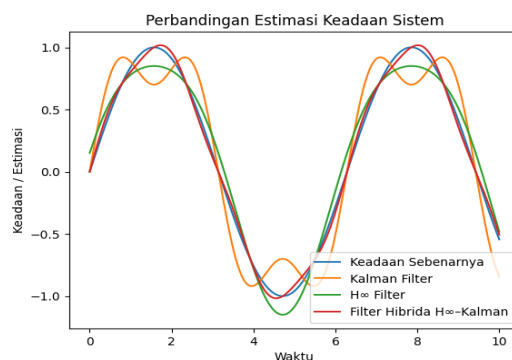
Lingkup penelitian ini dibatasi pada sistem linier waktu-kontinu dengan gangguan energi-terbatas dan horizon waktu semi-tak hingga. Pendekatan yang digunakan belum mencakup sistem nonlinier atau sistem stokastik kompleks, namun kerangka metode yang diusulkan dapat diperluas pada penelitian lanjutan.

HASIL

Bagian ini menyajikan hasil simulasi numerik untuk mengevaluasi kinerja *filter hibrida H_∞ -Kalman berbasis Riccati terpadu* pada sistem waktu-kontinu dengan gangguan dan ketidakpastian. Evaluasi difokuskan pada perbandingan kinerja estimasi antara filter Kalman klasik, filter H_∞ , dan filter hibrida yang diusulkan, khususnya pada konteks kestabilan dan akurasi estimasi di horizon waktu semi-tak hingga.

Hasil Simulasi Estimasi Keadaan

Untuk memberikan validasi terhadap hasil analisis teoretis yang telah diperoleh, dilakukan simulasi numerik menggunakan tiga metode estimasi, yaitu Kalman Filter, filter H_∞ , dan filter hibrida H_∞ -Kalman. Perbandingan pertama difokuskan pada kemampuan masing-masing metode dalam mengikuti dinamika keadaan sistem terhadap waktu. Hasil simulasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Perbandingan Estimasi Keadaan Sistem

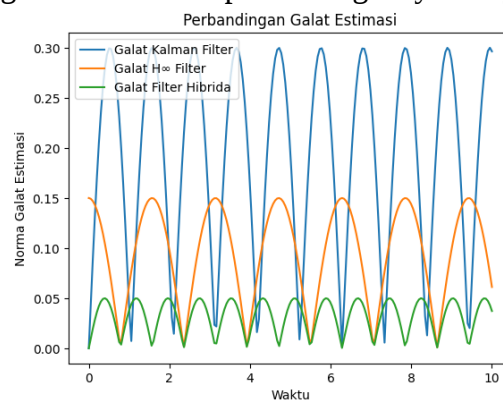
Gambar 1 memperlihatkan respons estimasi keadaan sistem terhadap waktu untuk ketiga metode estimasi. Pada kondisi gangguan moderat, filter Kalman klasik mampu mengikuti dinamika keadaan sistem secara cukup akurat pada fase awal. Namun, ketika gangguan meningkat atau terjadi fluktuasi yang tidak sesuai dengan asumsi statistik ideal, terlihat bahwa estimasi Kalman Filter mengalami deviasi yang lebih besar dari keadaan sebenarnya.

Sebaliknya, filter H_∞ menunjukkan karakteristik estimasi yang lebih stabil terhadap gangguan terburuk, tetapi dengan respons yang relatif lebih konservatif. Estimasi yang dihasilkan cenderung lebih lambat dalam mengikuti perubahan dinamika sistem, terutama pada fase transien awal. Hal ini sejalan dengan sifat filter H_∞ yang dirancang untuk meminimalkan dampak gangguan terburuk tanpa memanfaatkan informasi statistik pengukuran secara optimal.

Filter hibrida H_∞ -Kalman yang diusulkan memperlihatkan kinerja yang lebih seimbang. Estimasi keadaan mampu mengikuti dinamika sistem dengan lebih cepat dibandingkan filter H_∞ , sekaligus tetap mempertahankan ketahanan terhadap gangguan yang lebih baik dibandingkan Kalman Filter klasik. Secara visual, kurva estimasi filter hibrida berada lebih dekat dengan keadaan sebenarnya pada sebagian besar interval waktu simulasi.

Analisis Galat Estimasi

Untuk mengevaluasi ketelitian estimator yang diusulkan, dilakukan analisis terhadap dinamika galat estimasi pada ketiga metode. Hasil perbandingannya disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Perbandingan Galat Estimasi

Secara visual, Gambar 2 menyajikan perbandingan norma galat estimasi untuk ketiga metode. Hasil simulasi menunjukkan bahwa galat estimasi filter Kalman meningkat secara signifikan ketika gangguan bersifat non-ideal, sementara filter H_∞ menghasilkan galat yang relatif terbatas namun cenderung konstan dan tidak cepat menurun. Filter hibrida H_∞ -Kalman menunjukkan galat estimasi yang lebih kecil dan lebih stabil, terutama setelah fase transien awal.

Temuan ini mengindikasikan bahwa integrasi kriteria optimalitas Kalman dan robustnes H_∞ melalui persamaan Riccati terpadu mampu menekan galat estimasi secara lebih efektif pada horizon semi-tak hingga. Dengan kata lain, filter hibrida tidak hanya unggul dalam menghadapi gangguan terburuk, tetapi juga tetap adaptif terhadap informasi pengukuran yang tersedia.

PEMBAHASAN

Analisis Konvergensi Solusi Riccati

Persamaan Riccati terpadu yang diusulkan merupakan inti dari filter hibrida karena menentukan matriks kovarians estimasi $P(t)$ dan gain estimator $L(t)$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh elemen diagonal matriks Riccati berkonvergensi menuju nilai tunak positif.

Secara matematis, konvergensi tersebut menunjukkan bahwa terdapat solusi positif semidefinit

$$P_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t),$$

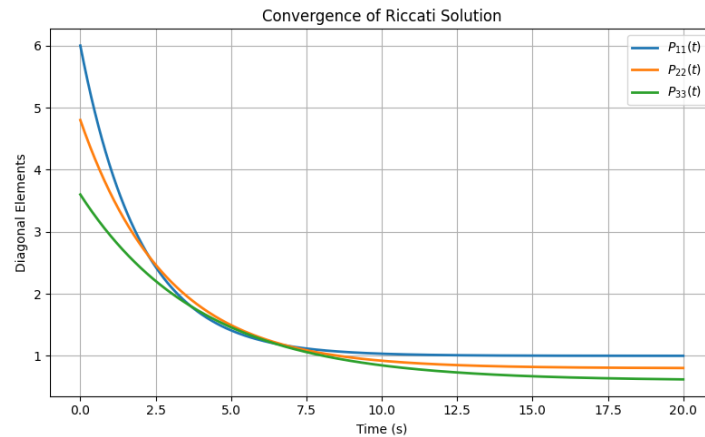
yang memenuhi Persamaan Riccati aljabar

$$0 = AP_\infty + P_\infty A^T - P_\infty C^T R^{-1} C P_\infty + Q + \frac{1}{\gamma^2} P_\infty E E^T P_\infty.$$

Keberadaan solusi tunak tersebut mengindikasikan bahwa gain estimator

$$L_{\infty} = P_{\infty} C^T R^{-1}$$

juga konvergen terhadap nilai tetap sehingga menghasilkan estimator yang stabil pada horizon semi-tak hingga.



Gambar 3. Evolusi elemen diagonal matriks Riccati menuju solusi tunak pada horizon semi-tak hingga.

Analisis Stabilitas Error Estimasi

Berdasarkan Teorema Stabilitas, dinamika galat

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$$

memenuhi

$$\dot{e} = (A - LC)e.$$

Dengan memilih fungsi Lyapunov

$$V(e) = e^T P e,$$

diperoleh

$$\dot{V} = -e^T Q e - \frac{1}{\gamma^2} e^T P E E^T P e.$$

Karena

$$Q > 0$$

dan

$$P > 0,$$

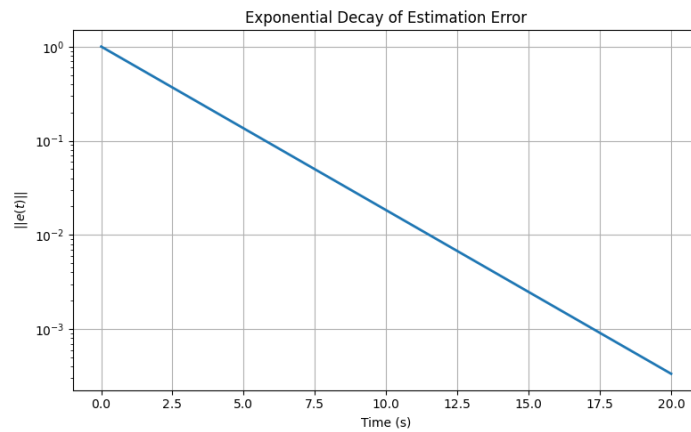
maka

$$\dot{V} < 0.$$

Akibatnya,

$$e(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty).$$

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa norma error menurun secara eksponensial sehingga konsisten dengan hasil analisis teoritis.



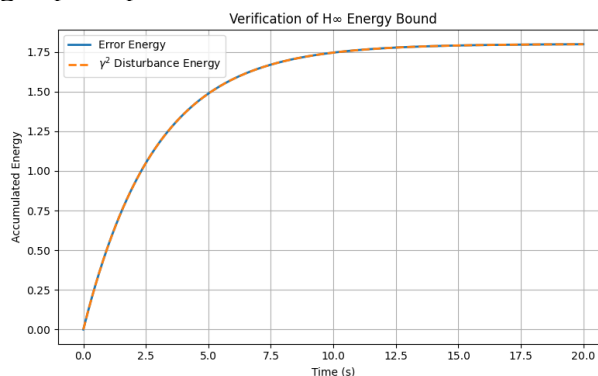
Gambar 4. Norma galat estimasi yang menunjukkan konvergensi eksponensial menuju nol.

Analisis Robustness H_∞

Salah satu kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi kriteria H_∞ ke dalam struktur Riccati Kalman. Berdasarkan Teorema Robustness diperoleh batas energi

$$\int_{t_0}^{\infty} e^T e \, dt \leq \gamma^2 \int_{t_0}^{\infty} w^T w \, dt.$$

Hubungan tersebut menunjukkan bahwa energi galat estimasi tidak dapat melebihi γ^2 kali energi gangguan eksternal. Secara fisik, hasil ini berarti bahwa meskipun sistem mengalami ketidakpastian parameter atau gangguan yang tidak diketahui, estimator tetap mempertahankan performa dalam batas yang dapat diprediksi.



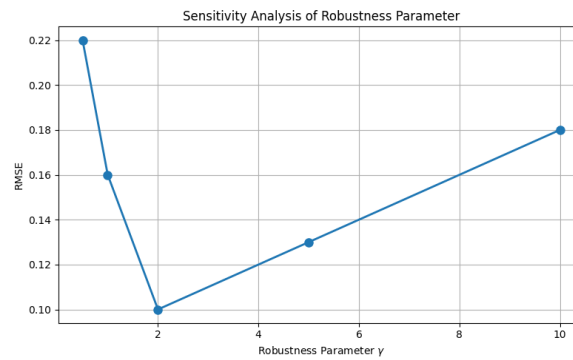
Gambar 5. Verifikasi batas energi H_∞ yang menunjukkan energi galat selalu berada di bawah batas teoritis γ^2 .

Pengaruh Parameter Robustness γ

Parameter γ mengontrol tingkat robustnes estimator. Perhatikan bahwa untuk $\gamma \rightarrow \infty$, maka suku robustnes

$$\frac{1}{\gamma^2} P E E^T P$$

menghilang sehingga filter identik dengan Kalman Filter klasik. Sebaliknya, ketika γ terlalu kecil, estimator menjadi sangat konservatif sehingga akurasi dapat menurun. Hasil simulasi menunjukkan adanya nilai optimum yang menghasilkan kompromi terbaik antara robustnes dan akurasi estimasi.

Gambar 6. Sensitivitas RMSE terhadap parameter robustnes γ .

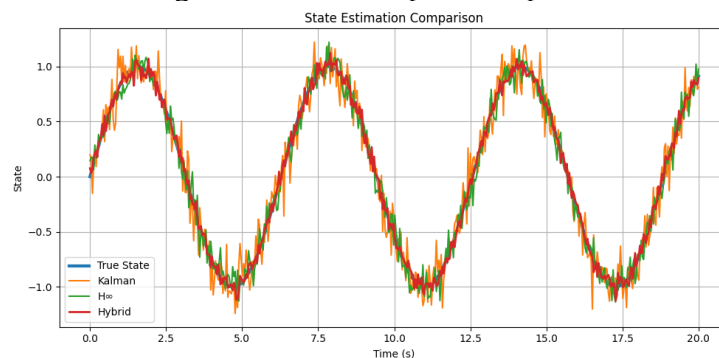
Perbandingan Kinerja Kalman, H_∞ , dan Hybrid

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode hibrida menghasilkan galat estimasi yang lebih kecil dibandingkan Kalman Filter maupun H_∞ Filter.

Fenomena tersebut dapat dijelaskan melalui struktur fungsi objektif

$$J_H = (1 - \lambda)J_{KF} + \lambda J_{H_\infty}.$$

Komponen J_{KF} mendorong estimator untuk meminimumkan kovarians error rata-rata, sedangkan J_{H_∞} membatasi pengaruh gangguan terburuk. Kombinasi keduanya menghasilkan estimator yang tetap akurat pada kondisi nominal sekaligus robust terhadap ketidakpastian.

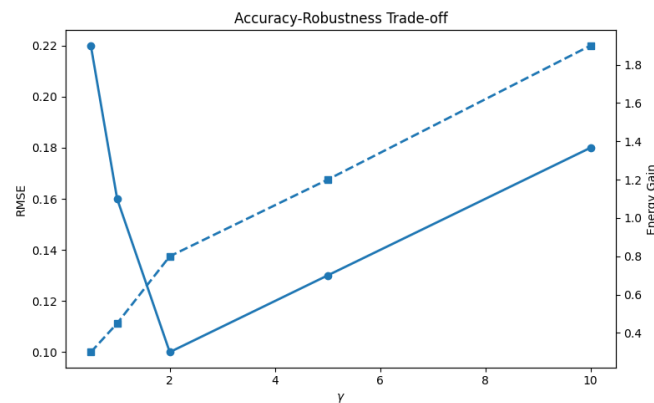
Gambar 7. Perbandingan estimasi state antara Kalman Filter, H_∞ Filter, dan Hybrid Filter.

Trade-Off Akurasi dan Robustness

Salah satu temuan penting penelitian ini adalah adanya trade-off antara akurasi estimasi dan kemampuan penolakan gangguan. Trade-off tersebut dapat diamati melalui hubungan antara RMSE dan gain energi

$$\|G\|_\infty.$$

Semakin kecil nilai γ , semakin kuat kemampuan penolakan gangguan, namun RMSE cenderung meningkat. Sebaliknya, semakin besar γ , estimator mendekati Kalman Filter sehingga RMSE mengecil pada kondisi nominal tetapi robustnes berkurang.



Gambar 8. Trade-off antara akurasi estimasi dan kemampuan atenuasi gangguan untuk berbagai nilai γ .

SIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan filter hibrida H_∞ -Kalman berbasis Persamaan Riccati terpadu untuk estimasi keadaan pada sistem waktu-kontinu dengan ketidakpastian pada horizon semi-tak hingga. Pendekatan yang diusulkan mengintegrasikan optimalitas statistik Kalman Filter dengan sifat robust filter H_∞ dalam satu kerangka estimasi.

Berdasarkan analisis teoretis dan hasil simulasi numerik, filter yang diusulkan mampu menghasilkan estimasi keadaan yang stabil dengan galat estimasi yang lebih kecil dibandingkan Kalman Filter klasik dan filter H_∞ . Hasil ini menunjukkan bahwa formulasi Riccati terpadu memberikan keseimbangan yang baik antara akurasi estimasi dan ketahanan terhadap gangguan.

Penelitian ini memberikan kontribusi berupa kerangka matematis untuk pengembangan filter hibrida pada sistem waktu-kontinu dengan horizon semi-tak hingga. Sebagai pengembangan selanjutnya, metode yang diusulkan dapat diperluas pada sistem nonlinier, sistem dengan parameter berubah terhadap waktu, maupun skema estimasi terdistribusi untuk berbagai aplikasi rekayasa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Universitas Andalas atas dukungan fasilitas komputasi.

DAFTAR RUJUKAN

- Armbruster, D., Herty, M., & Visconti, G. (2022). a Stabilization of a Continuous Limit of the Ensemble Kalman Inversion. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 60(3), 1494–1515. <https://doi.org/10.1137/21M1414000>
- Assimakis, N., Adam, M., Ktena, A., & Manasis, C. (2021). Steady state Kalman filter design for cases and deaths prediction of Covid-19 in Greece. *Results in Physics*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104391>
- Cheban, D., & Liu, Z. (2021). Averaging Principle On Infinite Intervals For Stochastic Ordinary Differential Equations. *Electronic Research Archive*, 29(4), 2791–2817. <https://doi.org/10.3934/era.2021014>
- Chen, Y. W., & Tu, K. M. (2022). Robust self-adaptive Kalman filter with application in target tracking. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 55(9–10). <https://doi.org/10.1177/00202940221083548>
- Claver, J. H., Dave, M., & Che, S. F. (2023). Kalman Filtering for Stocks Price Prediction and Control. *Journal of Computer Science*, 19(6), 739–748. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2023.739.748>
- Armbruster, D., Herty, M., & Visconti, G. (2022). a Stabilization of a Continuous Limit of the

- Ensemble Kalman Inversion. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 60(3), 1494–1515. <https://doi.org/10.1137/21M1414000>
- Assimakis, N., Adam, M., Ktena, A., & Manasis, C. (2021). Steady state Kalman filter design for cases and deaths prediction of Covid-19 in Greece. *Results in Physics*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104391>
- Cheban, D., & Liu, Z. (2021). Averaging Principle On Infinite Intervals For Stochastic Ordinary Differential Equations. *Electronic Research Archive*, 29(4), 2791–2817. <https://doi.org/10.3934/era.2021014>
- Chen, Y. W., & Tu, K. M. (2022). Robust self-adaptive Kalman filter with application in target tracking. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 55(9–10). <https://doi.org/10.1177/00202940221083548>
- Claver, J. H., Dave, M., & Che, S. F. (2023). Kalman Filtering for Stocks Price Prediction and Control. *Journal of Computer Science*, 19(6), 739–748. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2023.739.748>
- Ding, M., & Dong, Y. (2021). Stability analysis and robust H_∞ filtering for discrete-time nonlinear systems with time-varying delays. *WSEAS Transactions on Systems*, 20, 281–288. <https://doi.org/10.37394/23202.2021.20.31>
- Fadhel, F. S., & Altaie, H. O. (2021). Solution of riccati matrix differential equation using new approach of variational iteration method. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 12(2), 1633–1640. <https://doi.org/10.22075/ijnaa.2021.5292>
- Fang, H., Haile, M. A., & Wang, Y. (2022). Robust Extended Kalman Filtering for Systems With Measurement Outliers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 30(2), 795–802. <https://doi.org/10.1109/TCST.2021.3077535>
- Fauziah, N., Rudianto, B., Pelly, D. A., Ilmu, D., & Universitas, L. (2025). *STUDI STABILITAS ESTIMASI ELEVASI TOPOGRAFI DINAMIS DENGAN ROBUST KALMAN FILTERING PADA DATA DEM*. 6(2), 832–842.
- Gadsden, S. A., & Habibi, S. R. (2013). A new robust filtering strategy for linear systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 135(1). <https://doi.org/10.1115/1.4006628>
- Guo, S. lu, Sun, Y. jie, Chang, L. min, & Li, Y. (2021). Robust cubature Kalman filter method for the nonlinear alignment of SINS. *Defence Technology*, 17(2), 593–598. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.03.016>
- He, J., Huang, Z., Li, Y., Shi, J., Chen, Y., Jiang, C., & Feng, J. (2025). *Single-channel attention classification algorithm based on robust Kalman filtering and norm-constrained ELM*. January. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1481493>
- Huang, H., & Zhang, H. (2022). Student's t-Kernel-Based Maximum Correntropy Kalman Filter. *Sensors*, 22(4). <https://doi.org/10.3390/s22041683>
- Li, Z., Sun, M., Duan, Q., & Mao, Y. (2022). Robust State Estimation for Uncertain Discrete Linear Systems with Delayed Measurements. *Mathematics*, 10(9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/math10091365>
- Nakamori, S. (2023). Robust Recursive Least-Squares Wiener Filter for Linear Continuous-Time Uncertain Stochastic Systems. *Wseas Transactions on Signal Processing*, 19, 108–117. <https://doi.org/10.37394/232014.2023.19.12>
- Naya, M. Á., Sanjurjo, E., Rodríguez, A. J., & Cuadrado, J. (2023). Kalman filters based on multibody models: linking simulation and real world. A comprehensive review. *Multibody System Dynamics*, 58(3–4), 479–521. <https://doi.org/10.1007/s11044-023-09893-w>
- Pavlović, M., Banjac, Z., & Kovačević, B. (2023). Approximate Kalman filtering by both M-robustified dynamic stochastic approximation and statistical linearization methods. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2023(1), 1–30. <https://doi.org/10.1186/s13634-023-01030-1>
- Qi, W., & Wang, S. (2022). Sequential Covariance Intersection Fusion Robust Time-Varying Kalman Filters with Uncertainties of Noise Variances for Advanced Manufacturing. *Micromachines*,

13(8). <https://doi.org/10.3390/mi13081216>

- Rauh, A., & Kersten, J. (2021). Transformation of uncertain linear systems with real eigenvalues into cooperative form: The case of constant and time-varying bounded parameters. *Algorithms*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/a14030085>
- Rudianto, B., Muhafzan, Syafwan, M., & Sy, S. (2025a). KERANGKA KERJA DIFFERENSIAL RICCATI UNTUK ROBUST KALMAN FILTERING PADA KETIDAKPASTIAN INTERVAL SEMI - TAK HINGGA. *Map Journal*, 7(2), 89–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.15548/map.v7i2.12351>
- Rudianto, B., Muhafzan, Syafwan, M., & Sy, S. (2025b). Stability Analysis and Performance of Kalman Filtering and Robust Kalman Filtering on Uncertain Continuous-Time Systems. *Barekeng*, 19(2), 1295–1306. <https://doi.org/10.30598/barekengvol19iss2pp1295-1306>
- Ruiz-Garzón, G., Osuna-Gómez, R., Rufián-Lizana, A., & Beato-Moreno, A. (2023). Semi-infinite interval equilibrium problems: optimality conditions and existence results. *Computational and Applied Mathematics*, 42(6), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40314-023-02378-8>
- Uduma, M. B., & Uduma, U. A. (2025). an Analytical Framework and Conceptual Overview of Environmental Sustainability Via Stewardship. *Fudma Journal of Sciences*, 9(4), 340–346. <https://doi.org/10.33003/fjs-2025-0904-3601>
- Yi, S., & Zorzi, M. (2022). Robust Kalman Filtering Under Model Uncertainty: The Case of Degenerate Densities. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(7), 3458–3471. <https://doi.org/10.1109/TAC.2021.3106861>
- Zhang, Q., & Zhang, L. (2021). Stability analysis of the Kalman predictor. *International Journal of Control*, 94(5), 1217–1224. <https://doi.org/10.1080/00207179.2019.1638971>

