

Penerapan Wavelet Transform pada Analisis Error Pembacaan Internal Measurement Unit dengan Berbagai Variasi Level Cairan pada Tangki Drone Sprayer di PT. Frogs Indonesia Yogyakarta

Jamrud Aminuddin^{1,2*}, Nazrul Effendy¹, Faridah¹, Safira Afrilianti², Hasna Farras Tsaabitah², Nanda Mardiana Azzahra², Reo Yudhono³

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

²Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto.

³PT. Inovasi Solusi Transportasi Indonesia, Yogyakarta

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i>	Sloshing in the drone sprayer tank can disrupt IMU readings and reduce control stability. This study evaluates the influence of 1–5 liter liquid levels on IMU errors and the effectiveness of DWT using the Daubechies 4 basis with three decomposition levels, where D1 was removed, D2 was processed with soft thresholding, and A3–D3 were retained. The highest errors occurred at 1–2 liters, indicated by higher RMSE values. After denoising, RMSE decreased significantly up to 65.90% on the y-acceleration axis demonstrating that DWT is effective in reducing noise and improving sensor accuracy to maintain drone stability under dynamic conditions.
Received October 6, 2025	
Accepted November 25, 2025	

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i>	Sloshing pada tangki drone sprayer dapat mengganggu pembacaan IMU dan menurunkan kestabilan kendali. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh level cairan 1–5 liter terhadap error IMU serta efektivitas DWT berbasis Daubechies 4 dengan tiga level dekomposisi, di mana D1 dihapus, D2 diberi soft thresholding, dan A3–D3 dipertahankan. Error tertinggi terjadi pada level 1–2 liter, ditunjukkan oleh nilai RMSE yang lebih besar. Setelah denoising, RMSE menurun signifikan hingga 65,90% pada sumbu y-acceleration sehingga DWT terbukti efektif mereduksi noise dan meningkatkan akurasi sensor untuk menjaga kestabilan drone dalam kondisi dinamis.
Diserahkan: 6 Oktober 2025	
Diterim: 25 November 2025	

1. PENDAHULUAN

Penggunaan drone sprayer telah menjadi terobosan penting dalam praktik pertanian modern, terutama dalam proses penyemprotan pupuk dan pestisida cair. Teknologi ini menawarkan efisiensi tinggi dengan kemampuan menjangkau area pertanian secara cepat, merata, dan presisi, sehingga membantu petani menghemat waktu, tenaga, dan biaya operasional. Dibandingkan metode manual atau alat penyemprot konvensional, drone sprayer mampu mengurangi kontak langsung pekerja dengan bahan kimia berbahaya, sehingga meningkatkan aspek keselamatan di lapangan. Selain itu, penyemprotan berbasis

*Corresponding author. Jamrud Aminuddin

Email address: jamrud.aminuddin@unsoed.ac.id

drone memungkinkan pengaturan volume semprot, ukuran droplet, serta pola distribusi yang lebih akurat sehingga mengoptimalkan efektivitas pupuk maupun pestisida sekaligus meminimalkan pemborosan bahan (Hariyanto *et al.*, 2023).

Dalam skala produksi besar, drone sprayer juga terbukti sangat bermanfaat untuk mengatasi tantangan geografis seperti lahan berbukit, sawah berlumpur, area luas yang sulit dijangkau, serta kondisi cuaca tertentu yang menghambat penggunaan alat berat. Integrasi teknologi GPS, sensor ketinggian, dan sistem navigasi cerdas memungkinkan drone bergerak secara stabil dan terkontrol, menghasilkan cakupan penyemprotan yang konsisten. Oleh karena itu, drone sprayer tidak hanya berperan sebagai alat bantu teknis, tetapi telah menjadi bagian dari transformasi digital pertanian yang mendorong produktivitas, keberlanjutan, serta peningkatan kualitas hasil pertanian secara keseluruhan (Hariyanto *et al.*, 2023).

Drone sprayer merupakan salah satu teknologi yang digunakan di sektor pertanian. Teknologi ini berfungsi sebagai alat penyemprotan pupuk dan pestisida pada tanaman. Menurut penelitian penggunaan *drone* dapat meningkatkan efektivitas, baik dalam hal waktu penggeraan maupun ketepatan jumlah pupuk yang digunakan (Hariyanto *et al.*, 2023). Sementara itu, penelitian terkait uji coba penerbangan *drone quadcopter* pada dua kondisi, yaitu dengan beban dan tanpa beban. Penelitian tersebut bertujuan untuk menganalisis sikap terbang (*attitude*) serta daya angkat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sikap terbang *drone* tanpa beban cenderung lebih stabil dibandingkan saat membawa beban (Widiasari , Este 2020).

Saat *drone* terbang membawa cairan dalam tangki, gerakan cairan tersebut dapat menimbulkan efek *slosh*, yaitu pergerakan cairan yang menciptakan gaya dinamis yang tidak seimbang. Kondisi ini dapat menyebabkan ketidakstabilan, terutama saat *drone* mengubah arah atau menghadapi gangguan di udara (Ahmed *et al.*, 2022). Dalam pengoperasiannya, *drone sprayer* harus menjaga stabilitas selama penerbangan. Stabilitas ini penting karena gangguan selama proses penyemprotan cairan dapat memengaruhi ketepatan hasil penyemprotan. *Drone* dinyatakan stabil apabila memiliki kemampuan kembali ke kondisi keseimbangan awal setelah terjadi gangguan (Rerung, Setiawan 2020).

Flight Controller (FC) merupakan komponen utama dalam sistem kendali *drone* yang berfungsi untuk mengatur stabilitas dan arah gerak *drone* (Roviyan and Mashoedah 2024) Salah satu sensor penting yang digunakan dalam sistem tersebut adalah *Internal Measurement Unit* (IMU), yang dirancang untuk mengukur percepatan linear dan mendeteksi perubahan rotasi. Pergerakan cairan yang tak terduga di dalam tangki dapat menyebabkan guncangan dan getaran tak teratur pada *drone*. Gangguan tersebut dapat memengaruhi pembacaan sensor IMU sehingga menghasilkan data yang tidak akurat. Selain itu, gerakan cairan pada tangki juga dapat memicu gerakan tambahan yang tidak diinginkan. Kondisi ini dapat menyulitkan *drone* dalam menentukan sudut orientasi yang tepat dan berpotensi menyebabkan kesalahan navigasi serta kendali penerbangan (Ahmed *et al.*, 2022).

Gangguan dalam pembacaan sensor IMU dapat dikurangi dengan metode penyaringan (*filterisasi*) untuk mengurangi *noise*. Kinerja kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) berperan penting dalam menjaga stabilitas dan kelancaran operasional *drone sprayer*. Namun, jika terjadi kesalahan dalam pembacaan IMU akibat efek *slosh*, maka efektivitas kontrol PID dapat menurun. Kondisi ini berpotensi menimbulkan gangguan pada stabilitas penerbangan, penurunan akurasi penyemprotan, atau bahkan meningkatkan resiko kecelakaan.

Meskipun *Flight Controller* (FC) jenis K++ V2 telah dilengkapi dengan sistem navigasi canggih seperti *triple redundant* IMU, dual *redundant* barometer, serta kemampuan pemantauan data sensor secara *real time* melalui algoritma diagnostik internal, namun dengan spesifikasi tersebut permasalahan akibat efek *slosh* masih menjadi tantangan. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan data yang bersifat mendadak dan tidak terduga yang sulit terdeteksi oleh filter konvensional seperti kalman filter yang terintegrasi dalam sistem. Oleh karena itu, diperlukan metode analisis sinyal yang mampu mendeteksi dan mengisolasi *noise* secara efektif tanpa menghilangkan karakteristik penting dari sinyal utama .

Salah satu metode yang terbukti efektif untuk mengurangi *noise* pada pembacaan IMU adalah *wavelet transform* , hal ini dikarenakan metode ini memungkinkan dekomposisi sinyal berbasis waktu-frekuensi yang dapat menganalisis perubahan sinyal dalam skala yang berbeda. Berdasarkan penelitian sebelumnya, hasil pengujian penghilangan derau (*noise*) data sinyal sensor IMU menggunakan metode *Discrete Wavelet Transform* (DWT). Pada sistem pengenalan postur menunjukkan bahwa metode tersebut mampu menghilangkan derau secara efektif, dengan rata-rata nilai *Mean Squared Error* (MSE) sebesar 0,0000009527 (Lewi et al., 2021). Namun, penelitian tersebut berfokus pada IMU untuk sistem pengenalan postur, sedangkan IMU pada *drone sprayer* berada di dalam *flight controller* yang memiliki lingkungan kerja berbeda.

Oleh karena itu penting untuk dilakukan peninjauan terhadap *error* pembacaan sensor IMU yang disebabkan oleh efek *slosh*, dengan mempertimbangkan variasi level cairan dalam tangki *drone sprayer*. Peninjauan ini secara khusus berfokus pada penerapan metode *wavelet transform* untuk mengurangi *noise* pada data IMU guna meningkatkan akurasi pembacaan sensor dan stabilitas *drone sprayer*. Dengan menerapkan metode ini, diharapkan akurasi data akselerasi dan orientasi dapat ditingkatkan, sehingga kontrol penerbangan menjadi lebih stabil dalam menghadapi variasi level cairan.

2. METODE PELAKSANAAN

Pengumpulan data IMU dilakukan melalui serangkaian eksperimen terstruktur yang dirancang untuk menangkap dinamika drone secara akurat sekaligus merepresentasikan kondisi operasional di lapangan. Proses dimulai dengan penyiapan perangkat sensor, yaitu modul IMU utama yang digunakan pada drone serta satu unit IMU referensi berkualitas lebih tinggi sebagai pembanding. Kedua sensor dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengoreksi bias, skala, dan penyelarasan orientasi sehingga data yang dicatat berada pada kondisi optimal. Seluruh sinyal akselerasi dan kecepatan sudut direkam pada laju sampel yang konsisten, kemudian disinkronkan dengan sistem pencatatan waktu untuk memudahkan analisis lanjutan.

Eksperimen dilakukan dalam berbagai kondisi yang merepresentasikan manuver khas drone sprayer. Drone diterbangkan dengan urutan manuver yang telah distandardisasi, seperti hover stabil, akselerasi maju, rotasi yaw, serta beberapa manuver transien yang memicu perubahan gerak mendadak. Setiap manuver diulang beberapa kali untuk memperoleh data yang konsisten dan dapat dianalisis secara statistik. Selain itu, pengujian dilakukan pada berbagai tingkat level cairan penuh, menengah, dan hampir habis untuk menangkap efek dinamika cairan terhadap gangguan data IMU. Lingkungan pengujian dipilih secara beragam, mulai dari area indoor yang terkontrol hingga kondisi outdoor dengan gangguan angin ringan, sehingga variasi kondisi nyata dapat direpresentasikan.

Selama eksperimen, variabel-variabel penting seperti berat total drone, konfigurasi motor, kecepatan rotor, serta karakteristik tangki cairan dijaga tetap konstan agar pengaruh gangguan dapat diamati dengan jelas. Setiap sesi penerbangan direkam bersamaan dengan

data log telemetri dan catatan kondisi lingkungan sebagai bagian dari dokumentasi eksperimen. Melalui prosedur yang sistematis ini, data IMU yang terkumpul tidak hanya merefleksikan kondisi dinamis drone secara aktual, tetapi juga memberikan dasar yang kuat untuk proses pemrosesan sinyal, analisis denoising, serta validasi kinerja metode seperti *Discrete Wavelet Transform* (DWT).

Wavelet Transform merupakan metode matematis untuk analisis sinyal yang mampu memberikan representasi waktu–frekuensi secara fleksibel. Dibandingkan *Fourier Transform*, metode ini lebih unggul dalam merepresentasikan sinyal dengan diskontinuitas atau puncak tajam, serta dalam menganalisis sinyal terbatas, nonperiodik, dan tidak stasioner (Mehra 2018). *Discrete Wavelet Transform* (DWT) digunakan untuk menganalisis sinyal diskrit dan mendeteksi *noise* secara efisien. Kelebihan utama DWT meliputi: (a) analisis multiresolusi yang memungkinkan pengamatan sinyal pada berbagai rentang frekuensi, (b) pelokalan fitur pada domain waktu maupun frekuensi, (c) kompresi energi yang memisahkan informasi penting dari *noise*, serta (d) efisiensi komputasi melalui penggunaan filter bank dan proses *downsampling* (Ogaili et al., 2023).

Proses kerja *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dimulai dengan melewatkannya sinyal melalui *low-pass filter* dan *high-pass filter*. Hasil *low-pass filter* menghasilkan *Approximation Coefficient* (AC), sedangkan *high-pass filter* menghasilkan *Detail Coefficient* (DC). Kedua keluaran ini kemudian dilakukan *sub-sampling* (Lewi et al., 2021).

2.1 Mother wavelet

Mother wavelet berperan sebagai basis utama dalam dekomposisi sinyal untuk keperluan *denoising*. Pemilihan *mother wavelet* dipengaruhi oleh karakteristik sinyal, resolusi waktu–frekuensi yang dibutuhkan, dan pola kerusakan yang dianalisis. Berbagai keluarga *wavelet*, seperti *Haar*, *Daubechies*, *Symlets*, dan *Coiflets*, memiliki karakteristik masing-masing. Untuk sinyal getaran yang kompleks, *wavelet Daubechies* orde ke-4 (db4) banyak digunakan karena memberikan keseimbangan yang baik antara resolusi waktu dan frekuensi (Lewi et al., 2021).

2.2 Dekomposisi *wavelet*

Pada tahap dekomposisi, sinyal diuraikan menjadi AC dan DC. Proses ini dapat dilakukan secara bertingkat hingga level tertentu untuk mendapatkan representasi fitur frekuensi yang lebih detail. Hasil dekomposisi pada setiap level menghasilkan pembagian sinyal ke dalam pita frekuensi tertentu sesuai kebutuhan analisis (Lewi et al., 2021). Langkah ini dilakukan untuk menentukan level dekomposisi *wavelet* yang digunakan dalam penelitian. Sebelum melakukan tahap utama perhitungan, nilai *sampling rate* terlebih dahulu ditentukan menggunakan persamaan (1).

$$f_s = \frac{1000}{\Delta t_{ms}} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

Dengan nilai Δt merupakan selisih waktu antar dua sampel yang diperoleh dari data *timestamp* dalam satuan milidetik (ms), sesuai dengan satuan waktu keluaran dari sistem pencatatan data *drone*. Setelah memperoleh nilai *sampling rate*, langkah selanjutnya adalah menghitung frekuensi *sloshing* pada tangki dengan menggunakan rumus dinamika fluida dalam ruang tertutup. Tangki yang digunakan dalam penelitian ini memiliki bentuk heksagonal datar, dengan dimensi panjang horizontal bagian bawah sebesar 29 cm, tinggi sebesar 18,6 cm, dan lebar bagian atas sebesar 22 cm. Bentuk geometri ini menyebabkan perubahan dimensi permukaan fluida secara bertahap seiring dengan naiknya tinggi cairan. Untuk itu, perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi aktual pada dua kondisi batas, yaitu saat tinggi cairan 7,6 cm dan maksimum 16,98 cm Masing-masing dari

tinggi tersebut mewakili volume 1 liter dan 5 liter sesuai dengan kapasitas kerja tangki. Perumusan dalam penelitian ini menggunakan frekuensi perilaku fluida dalam tangki persegi.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot \pi^2}{L} \cdot \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

Berdasarkan hasil perhitungan, frekuensi *sloshing* minimum pada tinggi cairan 7,6 cm dengan lebar tangki 29 cm sebesar 1,37 Hz, sedangkan frekuensi maksimum berada pada ketinggian 16,988 cm dengan lebar tangki 22 cm sebesar 1,87 Hz (Lewi *et al.*, 2021).

2.3 Level Wavelet

Level wavelet menunjukkan kedalaman dekomposisi sinyal. Penentuan jumlah level ditentukan berdasarkan panjang sinyal, jenis wavelet yang digunakan, serta frekuensi sistem. Jumlah level dekomposisi dapat diperkirakan menggunakan persamaan (3).

$$n_f = \frac{\log\left(\frac{f_s}{f}\right)}{\log(2)} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

Dengan f_s adalah laju pengambilan sample (*sampling rate*) dalam satuan sampel per detik dan f merupakan frekuensi sistem (Ogaili *et al.*, 2023).

2.4 Thresholding

Thresholding merupakan teknik untuk mengurangi *noise* pada sinyal dengan memfilter koefisien yang bernilai di bawah ambang tertentu. Metode ini dapat dilakukan menggunakan pendekatan *Universal Thresholding*, *Sure Shrink*, *Bayes*, maupun *Minimax*, serta dapat diterapkan dalam bentuk *hard thresholding* maupun *soft thresholding* sesuai kebutuhan analisis (Lewi *et al.*, 2021).

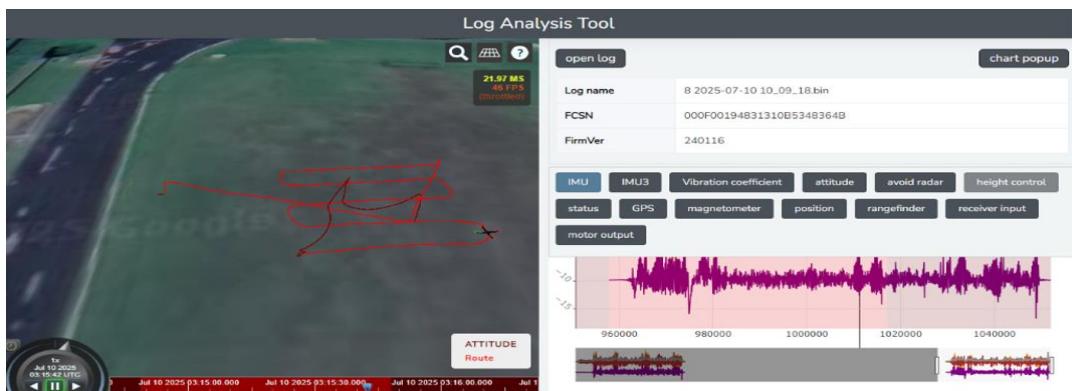
2.5 Validasi

Metode validasi yang diterapkan dalam penelitian ini dirancang dengan merujuk pada pendekatan yang telah digunakan oleh peneliti sebelumnya, sehingga proses evaluasi kinerja denoising dapat dipastikan berada pada jalur yang konsisten dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Studi-studi awal tentang pemrosesan sinyal berbasis wavelet menunjukkan bahwa validasi efektivitas DWT umumnya dilakukan melalui perbandingan langsung antara sinyal hasil penyaringan dan sinyal referensi atau *ground truth*, sebagaimana diterapkan pada (Lewi *et al.*, 2021). yang memanfaatkan IMU referensi untuk menilai seberapa baik DWT menghilangkan derau tanpa merusak struktur gerak dasar. Pola validasi berbasis RMSE yang diterapkan dalam penelitian ini mengikuti pendekatan tersebut, di mana penurunan error dijadikan indikator utama kualitas denoising.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji Terbang Drone dan Validasi Data

Sebelum pengambilan data utama, *drone* diuji terlebih dahulu tanpa beban cairan untuk memastikan kestabilan terbang. Hasil uji coba menunjukkan bahwa *drone* mampu terbang stabil sesuai dengan skenario yang dirancang. Sistem kontrol, navigasi, serta perangkat pencatat data berfungsi optimal. Sensor IMU tidak mengalami gangguan teknis, sehingga data yang dikumpulkan dapat dianggap valid untuk analisis pada kondisi variasi level cairan. Pola penerbangan zig-zag dipilih untuk mensimulasikan skenario penyemprotan lahan (Gambar 1). Pada uji terbang ini cairan tidak dikeluarkan dari tangki sehingga level cairan tetap konstan.



Gambar 1.

Log data uji coba penerbangan drone.

3.2 Analisis Error Sensor IMU pada Variasi Level Cairan

Pengujian menggunakan lima variasi level cairan dengan tiga kali pengulangan pada masing-masing variasi, sehingga diperoleh 15 dataset (Tabel 1). Nilai sensor *accelerometer*, *gyroscope*, dan *vibration* direkam pada sumbu *x*, *y*, dan *z* dengan resolusi waktu 1 ms. Perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE) dilakukan dengan membandingkan hasil IMU terhadap *ground truth* untuk mengukur tingkat kesalahan pembacaan.

Tabel 1.

Perbandingan RSME IMU terhadap ground truth

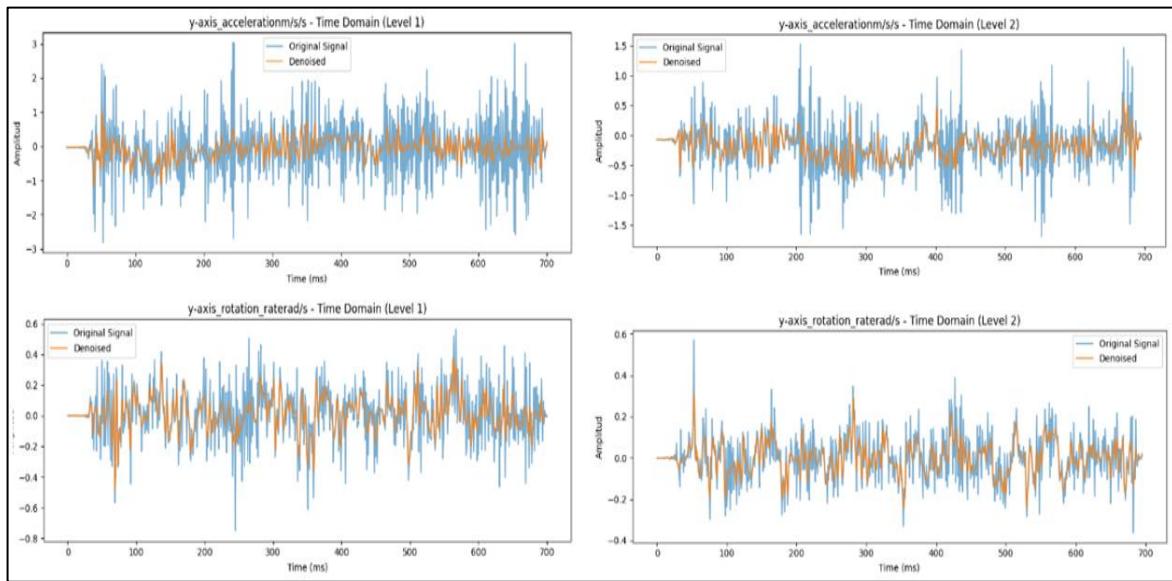
Level	x-axis_rot action_rate (rad/s)	y-axis_rot action_rate (rad/s)	z-axis_rot action_rate (rad/s)	x-axis_ac celerati on (m/s)	y-axis_ac celerati on (m/s)	z-axis_ac celerati on (m/s)	x-axis_vibr ation	y-axis_vibr ation	z-axis_vibr ation
1	0,2362	0,1798	0,2226	0,6379	0,8871	0,6671	0,9569	1,4560	0,9127
2	0,1193	0,1132	0,2075	0,4262	0,4696	0,7291	0,5385	0,6759	0,7403
3	0,0799	0,1074	0,2133	0,3695	0,2439	0,4108	0,3226	0,3301	0,3256
4	0,0882	0,0891	0,2185	0,2958	0,2895	0,3819	0,2549	0,3921	0,2359
5	0,0838	0,0881	0,2139	0,2854	0,2999	0,3705	0,2034	0,3814	0,2667

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai RMSE *accelerometer* dan *gyroscope* tertinggi terjadi pada level cairan rendah, yaitu 1 liter dan 2 liter. Kondisi ini mengindikasikan adanya gangguan akibat fenomena *sloshing*, di mana pergerakan bebas cairan dalam tangki menghasilkan gaya dinamis tambahan yang memengaruhi pembacaan sensor. Hal serupa terjadi pada sensor *vibration*, di mana nilai RMSE relatif tinggi pada volume rendah yang menandakan adanya getaran internal signifikan. Temuan ini sejalan dengan (Engelsman & Klein 2022), yang menyebutkan bahwa amplitudo *sloshing* lebih besar pada level cairan rendah karena ruang gerak permukaan fluida lebih luas.

Sebaliknya, pada level cairan 3 liter hingga 5 liter, nilai RMSE cenderung menurun. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan volume cairan mengurangi amplitudo *sloshing*, sehingga pembacaan IMU menjadi lebih stabil. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *error* pembacaan sensor IMU sangat dipengaruhi oleh dinamika fluida di dalam tangki, terutama pada kondisi volume rendah.

2.3 Peningkatan Akurasi dengan Discrete Wavelet Transform

Proses denoising dilakukan menggunakan *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dengan basis Daubechies 4 (db4) pada level dekomposisi 3. Tahapan *denoising* melibatkan penghapusan komponen detail pertama (D1) untuk mengeliminasi frekuensi tinggi di atas 2,5 Hz, penerapan *soft thresholding* pada detail kedua (D2) yang berada dalam rentang frekuensi alami *sloshing* (1,37–1,87 Hz), serta mempertahankan komponen D3 dan A3.



Gambar 2.

Denoised sinyal IMU

Hasil visual menunjukkan bahwa sinyal *accelerometer* dan *gyroscope* pada level cairan 1 liter dan 2 liter mengalami perbaikan signifikan setelah *denoising*. Fluktuasi tajam akibat *sloshing* berhasil dikurangi sehingga sinyal menjadi lebih halus dan representatif terhadap gerakan *drone*. Sebaliknya, pada level cairan lebih tinggi (3–5 liter), perubahan sebelum dan sesudah *denoising* relatif kecil karena sinyal awal sudah cukup stabil. Untuk sumbu z baik pada *accelerometer* maupun *gyroscope*, proses *denoising* hanya menghasilkan perbaikan minor karena sinyal dominan dipengaruhi gravitasi dan rotasi stabil. Sementara itu, sinyal *vibration* pada ketiga sumbu tidak menunjukkan perubahan signifikan setelah *denoising*. Hal ini mengindikasikan bahwa sinyal *vibration* sejak awal relatif stabil dan tidak banyak dipengaruhi noise acak, melainkan lebih merepresentasikan getaran ritmis internal *drone*.

Secara keseluruhan, integrasi DWT sebagai tahap filtering sebelum pemrosesan navigasi/kontrol dapat meningkatkan reliabilitas dan performa drone sprayer, karena sinyal IMU yang lebih akurat memberikan dasar yang lebih kuat bagi sistem kendali untuk menjaga stabilitas dan presisi dalam operasi nyata.

Penggunaan Discrete Wavelet Transform (DWT) untuk pra-pemrosesan sinyal IMU telah terbukti sangat efektif dalam menurunkan error estimasi, sebagaimana tercermin dari pengurangan *Root Mean Square Error* (RMSE). Misalnya, metode hybrid yang menggabungkan *lifting wavelet transform* dengan optimisasi genetika telah menunjukkan peningkatan akurasi inertial sensor, dengan penurunan RMSE yang signifikan dibandingkan data mentah (Alaeiyan et al., 2023). Selain itu, studi *data-driven denoising* pada sinyal akselerometer menggunakan wavelet menunjukkan bahwa wavelet denoising dapat mengurangi error rekonstruksi hingga sekitar 37,5% dibanding sinyal asli, dalam konteks RMSE (Engelsman & Klein 2022). Metode pra-filtering berbasis wavelet juga telah digunakan pada IMU berbiaya rendah (low-cost) untuk menekan noise jangka pendek, yang mana analisis eksperimen menunjukkan bahwa posisi dan kecepatan yang dihitung oleh INS (Inertial Navigation System) menjadi jauh lebih akurat setelah denoising wavelet (Hasan et al., 2020).

Secara fisik, peningkatan akurasi ini berarti bahwa sinyal akselerasi dan angular rate yang digunakan oleh algoritma navigasi dan kontrol (seperti Kalman Filter atau PID) menjadi lebih bersih dari komponen noise berfrekuensi tinggi dan gangguan transien.

Dengan error yang lebih rendah, estimasi orientasi dan posisi drone menjadi lebih stabil dan presisi. Bagi drone sprayer, hal ini berimplikasi langsung ke performa operasional: misalnya, stabilitas penerbangan meningkat, sehingga akurasi penyemprotan menjadi lebih konsisten; drift dan osilasi akibat gangguan sensor dapat diminimalkan; dan respons kontrol terhadap manuver berubah menjadi lebih halus, menurunkan risiko overshoot atau kerusakan pada sistem penyemprotan.

Tabel 2.

Perbandingan RMSE sebelum dan sesudah proses denoising

Level	Sinyal IMU	RMSE Sebelum	RMSE Sesudah	Penurunan RMSE (%)
1	<i>x</i> -rotation	0,2362	0,0845	64,2462
1	<i>y</i> -rotation	0,1798	0,1107	38,4290
1	<i>z</i> -rotation	0,2226	0,2175	2,2591
1	<i>x</i> -acceleration	0,6378	0,4165	34,6976
1	<i>y</i> -acceleration	0,8871	0,3025	65,8982
1	<i>z</i> -acceleration	0,6671	0,5139	22,9678
1	<i>x</i> -vibration	0,9569	0,9539	0,3129
1	<i>y</i> -vibration	1,4560	1,4519	0,2854
1	<i>z</i> -vibration	0,9127	0,9105	0,2448
2	<i>x</i> -rotation	0,1193	0,0639	46,4176
2	<i>y</i> -rotation	0,1132	0,0780	31,0998
2	<i>z</i> -rotation	0,2074	0,2058	0,8174
2	<i>x</i> -acceleration	0,4262	0,3223	24,3867
2	<i>y</i> -acceleration	0,4696	0,2688	42,7650
2	<i>z</i> -acceleration	0,7291	0,5183	28,9152
2	<i>x</i> -vibration	0,5385	0,5371	0,2523
2	<i>y</i> -vibration	0,6759	0,6734	0,3648
2	<i>z</i> -vibration	0,7403	0,7347	0,7517
3	<i>x</i> -rotation	0,0800	0,0608	24,0184
3	<i>y</i> -rotation	0,1074	0,0910	15,2547
3	<i>z</i> -rotation	0,2133	0,2127	0,2656
3	<i>x</i> -acceleration	0,3695	0,3343	9,5295
3	<i>y</i> -acceleration	0,2439	0,1932	20,7881
3	<i>z</i> -acceleration	0,4108	0,3478	15,3379
3	<i>x</i> -vibration	0,3226	0,3218	0,2600
3	<i>y</i> -vibration	0,3301	0,3292	0,2681
3	<i>z</i> -vibration	0,3256	0,3243	0,4041
4	<i>x</i> -rotation	0,0882	0,0663	24,8446
4	<i>y</i> -rotation	0,0891	0,0776	12,8318
4	<i>z</i> -rotation	0,2185	0,2180	0,2551
4	<i>x</i> -acceleration	0,2958	0,2675	9,5819
4	<i>y</i> -acceleration	0,2895	0,2344	19,0329
4	<i>z</i> -acceleration	0,3819	0,3517	7,9000
4	<i>x</i> -vibration	0,2549	0,2539	0,3730
4	<i>y</i> -vibration	0,3921	0,3911	0,2461
4	<i>z</i> -vibration	0,2360	0,2336	1,0020
5	<i>x</i> -rotation	0,0838	0,0576	31,3510
5	<i>y</i> -rotation	0,0881	0,0797	9,5297
5	<i>z</i> -rotation	0,2140	0,2129	0,4969
5	<i>x</i> -acceleration	0,2854	0,2645	7,3317
5	<i>y</i> -acceleration	0,2999	0,2183	27,1995
5	<i>z</i> -acceleration	0,3705	0,3353	9,5105
5	<i>x</i> -vibration	0,2034	0,2030	0,1945
5	<i>y</i> -vibration	0,3814	0,3799	0,3910
5	<i>z</i> -vibration	0,2667	0,2656	0,3996

Tabel 2 memperlihatkan perbandingan kuantitatif nilai RMSE sebelum dan sesudah *denoising*. Penurunan terbesar terjadi pada sumbu *y-accelerometer* pada level 1 liter, dengan penurunan RMSE sebesar 65,90%. Hal ini menunjukkan efektivitas metode DWT dalam mereduksi noise akibat sloshing pada sinyal tertentu. Sebaliknya, penurunan terkecil terdapat pada sumbu *x-vibration* di level 5 liter dengan nilai hanya 0,19%, yang menandakan keterbatasan pengaruh *denoising* pada sinyal yang sejak awal stabil.

Analisis RMSE pada data IMU menunjukkan bahwa kesalahan estimasi menjadi sangat tinggi ketika level cairan di dalam tangki berada pada posisi rendah. Ini mengindikasikan bahwa dinamika sloshing pada kondisi cairan hangat rendah sangat mengganggu kestabilan pembacaan sensor, karena pergerakan massal cairan menghasilkan gaya inertia yang tidak konsisten. Secara mekanik, fenomena ini dapat dijelaskan dengan model massa-spring-damper yang menggambarkan sloshing: saat tinggi cairan relatif rendah, rasio $h/Rh/R$ (tinggi cairan terhadap radius tangki) menurun, dan menurut studi sloshing pada tangki silinder, massa ekivalen mode slosh pertama meningkat pada rasio kecil. Hal ini berarti gelombang bebas cairan (*free surface*) mudah terstimulasi oleh percepatan manuver drone, sehingga frekuensi alami mode slosh rendah dan lebih mudah tereksitasi oleh dinamika drone (Jantontapo *et al.*, 2025).

Selain itu, sifat nonlinier dan fasa gangguan juga berperan: eksperimen menunjukkan terdapat lag fase antara pusat massa cairan dan eksitasi gerak, yang dapat menyebabkan respons maksimum non-linier di tingkat tertentu. Kondisi ini membuat filter konvensional seperti Kalman atau EKF sulit mengikuti perubahan cepat pada sinyal akibat sloshing, karena anggapan kestasioneran atau linearitas noise menjadi meleset. Disorientasi ini memperbesar error IMU khususnya di kondisi cairan rendah, karena gaya slosh lebih dominan dan tidak stabil secara mekanis (Bäuerlein & Avila 2021)

2.4 Hasil Validasi

Hasil validasi metode denoising pada penelitian ini menunjukkan pola peningkatan akurasi yang konsisten dengan temuan para peneliti sebelumnya. Ketika sinyal IMU yang telah diproses dibandingkan dengan studi terdahulu mengenai reduksi noise pada sensor inersia, terlihat bahwa metode berbasis transformasi waktu-frekuensi, khususnya Discrete Wavelet Transform (DWT), mampu memisahkan komponen sinyal utama dari gangguan non-stasioner secara efektif, sebagaimana dijelaskan dalam teori multiresolusi pada (Mallat 1989) dan analisis wavelet (Daubechies 1990). Kemampuan ini kembali terbukti pada konteks drone sprayer, di mana sinyal IMU sering dipengaruhi getaran motor, turbulensi angin, dan efek sloshing yang sifatnya dinamis.

Validasi menunjukkan bahwa nilai RMSE setelah penerapan DWT mengalami penurunan signifikan, sejalan dengan laporan pada (Lewi *et al.*, 2021) yang mendemonstrasikan bahwa DWT dapat menghilangkan derau pada sinyal IMU tanpa merusak struktur gerak dasar. Tren ini juga konsisten dengan (Ogaili *et al.*, 2023) yang menemukan bahwa DWT sangat efektif dalam ekstraksi sinyal penting dan deteksi gangguan struktural pada sistem yang mengalami vibrasi kompleks. Kesamaan hasil ini memperkuat keyakinan bahwa metode ini memang unggul dibandingkan filter konvensional yang sering melemahkan komponen dinamis sinyal.

Temuan validasi ini juga selaras dengan kajian mengenai dinamika sloshing yang menunjukkan bahwa respons cairan di dalam tangki memiliki sifat nonlinier dan sensitif terhadap percepatan mendadak. Pada (Ibrahim 2005) menjelaskan bahwa fenomena ini dapat menghasilkan gaya inersia tambahan yang tidak mudah diprediksi, sehingga mempengaruhi pembacaan IMU pada platform bergerak seperti drone. Hasil eksperimen

dalam penelitian ini mengonfirmasi bahwa DWT lebih mampu mengatasi gangguan tersebut dibandingkan filter linear, terutama ketika level cairan rendah dan gangguan sloshing lebih dominan. Dengan demikian, kesesuaian antara hasil validasi dan literatur menunjukkan bahwa pendekatan denoising berbasis DWT tidak hanya valid secara teoritis, tetapi juga efektif untuk diterapkan dalam sistem drone sprayer di lapangan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada level cairan 1 liter dan 2 liter, error pembacaan sensor IMU tercatat lebih tinggi dibandingkan dengan level cairan lainnya. Hal ini diidentifikasi melalui besarnya nilai RMSE antara hasil pembacaan sensor IMU dan data referensi (ground truth). Besarnya error ini disebabkan oleh efek sloshing, di mana pada volume cairan 1 liter dan 2 liter, ruang kosong di dalam tangki relatif lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan pergeseran massa cairan menjadi tidak stabil dan menghasilkan gangguan inersia yang terekam oleh sensor IMU.

Penerapan metode *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dengan basis Daubechies 4 (db4) terbukti efektif dalam mengurangi noise pada sinyal sensor IMU. *Denoising* dilakukan hingga level dekomposisi ke-3 dengan strategi menghapus D1, soft thresholding pada D2, serta mempertahankan A3 dan D3. Hasil evaluasi menggunakan RMSE menunjukkan penurunan signifikan, terutama pada sumbu y-*acceleration* (65,90%) saat volume cairan 1 liter, yang rentan terhadap efek sloshing. Sebaliknya, sumbu x-*vibration* pada 5 liter menunjukkan penurunan RMSE terkecil (0,19%) karena sinyal awal yang stabil. Secara keseluruhan, metode ini tidak hanya memperbaiki bentuk sinyal secara visual, tetapi juga meningkatkan akurasi pembacaan sensor secara numerik, yang penting untuk kestabilan dan performa sistem kendali drone dalam kondisi dinamis.

Penelitian ini masih memiliki sejumlah keterbatasan, terutama karena pengujian yang dilakukan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan yang sesungguhnya. Beberapa pengujian hanya dilakukan dalam skenario terkontrol sehingga belum menggambarkan variasi lingkungan nyata seperti angin tidak stabil, perubahan beban cairan selama penyemprotan, maupun karakteristik lahan pertanian yang beragam. Selain itu, implementasi metode pemrosesan sinyal seperti DWT masih sebatas pada tahap analisis teknis dan belum sepenuhnya diuji pada perangkat drone yang digunakan langsung oleh masyarakat.

Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengarah pada uji coba komprehensif di lingkungan nyata melalui kolaborasi dengan petani atau kelompok tani, sehingga dapat diperoleh pemahaman lebih baik mengenai kebutuhan operasional dan tantangan praktis di lapangan. Pengembangan sistem mitigasi slosh yang lebih adaptif, evaluasi berkelanjutan terhadap efektivitas penyaringan sinyal, serta peningkatan aspek keselamatan penerbangan juga menjadi agenda penting agar hasil penelitian benar-benar memberikan manfaat yang berkelanjutan bagi masyarakat pengguna teknologi drone sprayer.

Untuk meningkatkan keandalan sistem kendali drone, khususnya dalam mengatasi gangguan pembacaan IMU akibat efek slosh, diperlukan penerapan metode analisis sinyal yang lebih adaptif di tingkat rekayasa. Salah satu langkah praktis yang dapat diterapkan adalah integrasi *Discrete Wavelet Transform* (DWT) sebagai modul pra-pemrosesan tambahan pada jalur data IMU. Modul ini dapat ditempatkan sebelum algoritma filter utama sehingga mampu memisahkan komponen noise berfrekuensi tinggi tanpa menghilangkan informasi dinamis penting dari gerakan drone.

Dari sisi desain, perbaikan dapat dilakukan melalui optimalisasi tata letak tangki, penggunaan baffle internal untuk meredam gelombang cairan, serta pemilihan material peredam getaran yang lebih efektif pada dudukan IMU. Selain itu, pengujian terstruktur di lapangan perlu dilakukan untuk memvalidasi performa filter berbasis DWT pada berbagai kondisi muatan dan manuver. Langkah berikutnya yang direkomendasikan adalah pengembangan algoritma fusi sensor adaptif yang mampu menyesuaikan parameter filter secara real time, sehingga sistem kendali PID maupun *flight controller* dapat mempertahankan stabilitas meskipun terjadi perubahan mendadak pada sinyal akibat efek slosh. Implementasi berlapis ini akan memperkuat ketahanan sistem terhadap gangguan, meningkatkan akurasi operasional, dan meminimalkan risiko kegagalan penerbangan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terlaksananya kegiatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada kementerian riset, pendidikan tinggi, sains, dan teknologi atas dukungan dana dalam bentuk hibah Matching Fund Kedai Reka Tahun 2024 dengan No PKS Diktiristek: 386/E1/KS.00.00/2024 dan No PKS Perguruan Tinggi: T/902/UN.23/PT.01.03/2024. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, kepada Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, dan kepada PT. Inovasi Solusi Transportasi Indonesia (PT. Frogs), Yogyakarta atas dukungan fasilitas dalam kegiatan ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. A. A. Ogaili, M. N. Hamzah, A. A. Jaber, and E. Ghane. (2023). “Application of Discrete Wavelet Transform for Condition Monitoring and Fault Detection in Wind Turbine Blades: An Experimental Study,” *Engineering and Technology Journal*, 42(1),104–116. doi: 10.30684/etj.2023.142023.1516.
2. A. M. Hasan, K. Samsudin, A. R. Ramlie, and R. S. Azmir. (2020). “Wavelet-based pre-filtering for low cost inertial sensors,” *Journal of Applied Sciences*, 10(19),2217–2230. doi:10.3923/jas.2010.2217.2230.
3. Bäuerlein, B., & Avila, K. (2021). Phase lag predicts nonlinear response maxima in liquid-sloshing experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, 925, A22.
4. C. Widiasari and R. S. A. D. Este. (2020) “Rancang Bangun Drone Quadcopter Tanpa Awak Penyiram Pupuk Tanaman”, *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan*, 6(2),81-90.
5. Engelsman, D., & Klein, I. (2022). Data-driven denoising of stationary accelerometer signals. arXiv preprint arXiv:2206.05937.
6. E. B. Lewi, I. Wijayanto, and R. Patmasari. (2021). “Studi Penggunaan Tapis Wavelet untuk Penghilangan Derau Sinyal Sensor Unit Pengukuran Inersia pada Sistem Pengenalan Postur,” *e-Proceeding of Engineering* (pp. 292-298). Bandung : Universitas Telkom.
7. H. Alaeiyan, M. R. Mosavi, and A. Ayatollahi, “Hybrid noise removal to improve the accuracy of inertial sensors using a lifting wavelet transform optimized by a genetic algorithm. (2023).” *Alexandria Engineering Journal*, 80(2),326-341. doi:10.1016/j.aej.2023.08.069.
8. I. Daubechies. (1990). “The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, 36(5),961–1005.
9. K. Hariyanto, E. Poerwanto, and P. N. Santoso. (2023) “Analisis Efektifitas Drone pada Proses Pemupukan Cair untuk Meningkatkan Produktivitas Tanaman Pertanian Padi Organik”, *Jurnal ITDA* , 4(2), 105-111.

10. Mehra, Mani, V. K. Mehra, and M. Ahmad. Wavelets theory and its applications. Springer Singapore, 2018.
11. R. A. Ibrahim, *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2005.
12. S. Ahmed, H. Xin, M. Faheem, and B. Qiu .(2022) “Stability Analysis of a Sprayer UAV with a Liquid Tank with Different Outer Shapes and Inner Structures”, *Agriculture (Switzerland)*, 12(3), 379 . doi: 10.3390/agriculture12030379.
13. S. Mallat . (1989). “A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 11(7),674–693.
14. U. Jantontapo, P. Minyong, S. Deewanichsakul, P. Chotikunnan, R. Chotikunnan, dan N. Thongpance. (2025). “Effect of Liquid Height on Sloshing Dynamics in Cylindrical Containers Using H^∞ Control with Smooth Velocity Input,” *J. Robotics and Control*, 6(3),1163-1174. doi:10.18196/jrc.v6i3.26361.
15. Z. A. Rerung, E. Sofyan, and F. Setiawan. (2020). “Analisis Kestabilan Statik dan Dinamik pada Pesawat LSU-05 NG (Lapan Surveillance UAV 05 New Generation) dengan Menggunakan Perangkat Lunak XFLR5,” *Teknika STTKD : Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 6(2), 76-83.
16. Z. S. Roviyan and Mashoedah. (2024) “Development of Training KIT for Flying Wings UAV Robot Flight Controller as A Robotics Course Learning Media”, *Journal of Electronicsand Education*, 2(1), 29-42.