

Penerapan Extended Kalman Filter (EKF) Pada Sistem Monitoring Gelombang Laut Berbasis Sensor IMU GY955

Zindhu Maulana Ahmad Putra, Ryan Yudha Adhitya, Dani Wahyudi, Lucke Yuansyah
e-mail: zindhu@ppns.ac.id, ryanyudhaadhitya@ppns.ac.id, daniwahyudi@student.ppns.ac.id,
luckeyuansyahatp@gmail.com

Teknik Kelistrikan Kapal, Program Studi Teknik Otomasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Kampus ITS Sukolilo, Jl. Teknik Kimia, Keputih Sukolilo, Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 4 Agustus 2023
Direvisi 13 September 2023
Diterbitkan 30 September 2023

Kata kunci:

Filter Sinyal
Ketinggian Gelombang Laut
Extended Kalman Filter (EKF)

Keywords:

Signal Filtering
Wave Height
Extended Kalman Filter (EKF)

ABSTRAK

Ketinggian gelombang laut merupakan parameter penting yang dapat digunakan di berbagai aplikasi seperti mitigasi bencana tsunami, penentu keberangkatan kapal penumpang serta keperluan surveillance atau pengawasan untuk kajian pembangunan platform offshore. Mengingat pentingnya aplikasi tersebut saat ini dikembangkan buoy yang mampu mengirimkan informasi ketinggian gelombang laut berbasis sensor IMU yang umum digunakan seperti yang dimiliki NDBC (National Data Buoy Center) Amerika Serikat. Kelemahan utama sensor IMU adalah karakteristik data yang memiliki ripple atau riak ketika diterapkan untuk pengukuran ketinggian gelombang laut, sehingga informasi ketinggian puncak atau ketinggian rata-rata gelombang laut menjadi bias. Kelemahan tersebut mampu diminimalkan melalui filter sinyal, salah satunya adalah Extended Kalman Filter (EKF). Berdasarkan simulasi dengan sinyal sinus dan cosinus generator yang diberi noise dengan distribusi normal, penerapan EKF pada sensor GY 955 secara simulasi mampu mendapatkan simpangan baku sebesar: 0.239 cm dari yang sebelumnya: 0.680 cm untuk sinyal sinus dengan noise gaussian. Dan mendapatkan simpangan baku sebesar 0.335 cm dari yang sebelumnya = 0.7413 untuk sinyal cosinus dengan noise gaussian. Sedangkan pada saat pengambilan data dengan ketinggian puncak gelombang (peak amplitude) 100 cm yang diberikan pada periode berulang yaitu tiap 20 detik. Terlihat bahwa sistem monitoring pada penelitian ini mampu meredam noise dengan baik dan mampu mengikuti pola ketinggian gelombang laut aktual dengan selisih sebesar ± 5 cm.

ABSTRACT

The sea wave height is an important parameter that can be used in various applications such as tsunami disaster mitigation, determining the departure of passenger ships and the need for surveillance or supervision for the study of offshore platform development. Considering the importance of this application, a buoy is currently being developed that is capable of transmitting sea wave height information based on commonly used IMU sensors such as those of the United States National Data Buoy Center (NDBC). The main weakness of the IMU sensor is the characteristic of the data that has ripples when applied to the measurement of sea wave heights, so that the peak height or average height of ocean waves is biased. These weaknesses can be minimized through signal filters, one of which is the Extended Kalman Filter (EKF). Based on the simulation with a sine and cosine generator signal which is noise with a normal distribution, the application of EKF on the GY 955 sensor in a simulation is able to obtain a standard deviation of: 0.239 cm from the previous: 0.680 cm for a sine signal with gaussian noise. And get a standard deviation of 0.335 cm from the previous = 0.7413 for a cosine signal with gaussian noise. Meanwhile, at the time of data collection, the peak amplitude of 100



cm was given in a repeated period, namely every 20 seconds. It can be seen that the monitoring system in this study is able to reduce noise well and is able to follow the actual sea wave height pattern with a difference of ± 5 cm.

Penulis Korespondensi:

Zindhu Maulana Ahmad Putra
Prgram Studi Teknik Otomasi
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya
Email: zindhu@ppns.ac.id
Nomor HP/WA aktif: +62 895 0666 1013

1. PENDAHULUAN

Saat ini perkembangan teknologi sangat maju dengan pesat. Contohnya yang sangat cepat berkembang adalah bidang elektronika. Salah satunya adalah dengan otomatisasi alat bantu manusia yang sudah ada sekarang dapat bekerja lebih efisien dan efektif dalam meringankan pekerjaan manusia. Dengan perkembangan teknologi yang sangat pesat, tidak sedikit yang telah diterapkan serta membantu pekerjaan manusia dan salah satunya disektor maritim untuk keperluan mitigasi bencana. Bencana alam merupakan salah satu fenomena alam yang tidak dapat dihindari kejadiannya, namun dapat ditanggulangi beberapa kemungkinan yang buruk yang akan diterima. Salah satunya yaitu menanggulangi korban jiwa yang diakibatkan oleh bencana alam.

Dalam bencana alam banyak dampak yang dihasilkan, salah satunya korban jiwa. Kasus bencana alam yang diangkat kali ini yaitu fenomena tsunami, dimana fenomena ini dapat membahayakan bahkan menyebabkan korban jiwa untuk para nelayan. Fenomena tsunami sulit untuk diprediksi kejadiannya, oleh karena itu dengan perkembangan teknologi yang ada, ilmu pengetahuan dan teknologi dapat digunakan untuk membuat suatu peralatan yang dapat memberikan peringatan dini akan kemungkinan terjadinya tsunami di daerah tersebut. Dalam perhitungan akan terjadinya suatu bencana alam seperti fenomena tersebut banyak yang harus diperhatikan. Salah satu diantaranya ketinggian gelombang air laut. Dari parameter ketinggian gelombang diharapkan dapat menjadi acuan yang cukup untuk mendeteksi akan kemungkinan terjadinya gelombang tinggi dan fluktuatif [1][2][3]. Sehingga pada penelitian ini menawarkan perancangan prototype sistem monitoring gelombang air laut yang akan diuji di laboratorium instrumentasi dan kalibrasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Dimana alat ini mampu mengukur gelombang air laut berbasis mikrokontroler arduino. Adapun sensor yang akan digunakan yaitu sensor IMU (Inertial Measurement Unit) yang berfungsi mendeteksi gelombang air yang ada pada saat itu.

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan penelitian penggunaan sensor IMU untuk memprediksi ketinggian dan periode gelombang air laut [4] serta untuk perencanaan lintasan pesawat udara nir awak [5]. Pada paper tersebut menunjukkan bahwa sensor IMU memiliki kelemahan pada karakteristiknya yang memiliki tingkat presisi yang rendah, sensor IMU juga memiliki kelemahan yaitu informasi yang dihasilkan non linear dan memiliki ripple untuk aplikasi pengukuran gelombang laut. Untuk meminimalkan ketidakstabilan sinyal yang dihasilkan oleh sensor IMU pada penelitian ini menerapkan filter aktif yaitu Extended Kalman Filter (EKF) [6][7][8][9][10], diharapkan dengan penggunaan filter ini akan menghasilkan sinyal yang representatif dan mampu menekan bias. Prototype ini diharapkan dapat dikembangkan menjadi alat yang siap guna untuk mitigasi bencana tsunami sehingga dapat meminimalisir kemungkinan kecelakaan maupun jatuhnya korban jiwa bagi nelayan maupun masyarakat disekitar area tersebut. Tidak hanya pada aplikasi mitigasi bencana, perbaikan pembacaan sensor IMU untuk mengukur ketinggian gelombang laut dengan menggunakan filter EKF dapat diaplikasikan untuk kepentingan lain seperti: penentu keberangkatan kapal penumpang serta keperluan surveillance atau pengawasan untuk kajian pembangunan platform offshore.

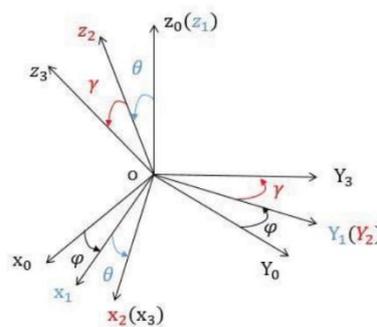


2. METODE PENELITIAN

2.1 *Inertial Measuring Unit (IMU)*

Inertial Measurement Unit merupakan sebuah alat yang memanfaatkan sistem pengukuran seperti gyroskop dan akselerometer untuk memperkirakan posisi relatif, kecepatan, dan akselerasi dari suatu benda. Sensor ini terdiri dari akselerometer 3 axis dan gyroskop 3 axis. Akselerometer merupakan perangkat elektromekanis yang dapat mendeteksi gaya statis dan dinamis dari percepatan linear, yaitu perubahan kecepatan suatu benda. Percepatan diukur dalam meter per detik kuadrat (m/s^2). Kekuatan statis salah satunya gravitasi dan kekuatan dinamis yaitu mencakup gerakan dan getaran. Akselerometer berisi piring kapasitif internal. Selama lempeng ini bergerak dalam hubungan satu sama yang lain, kapasitansi antara mereka berubah.

Dari perubahan tersebut percepatan dapat ditentukan. Gyroskop merupakan perangkat elektromekanikal yang berfungsi mengukur perubahan sudut sumbu putar tetap terhadap ruang inersia. Satuan kecepatan sudut dapat diukur dalam derajat per detik (o/s) atau rotasi per detik (RPS). Sebuah gyroskop dapat mengukur rotasi sekitar tiga sumbu x , y , z . Ketika gyroskop diputar, sensor akan beresonansi kecil yang kemudian diubah menjadi perubahan kecepatan sudut. Getaran inilah yang akan dikonversi menjadi sinyal listrik. Komponen sensor IMU yang digunakan pada penelitian ini adalah sumbu z (z -axis) karena kebutuhan pengukuran hanya pada ketinggian gelombang laut. Diagram perubahan dari sistem koordinat grafik ke sistem koordinat sensor ditunjukkan Gambar 1 di bawah ini:



Gambar 1: Diagram Skematik Perubahan dari Sistem Koordinat geografik ke Sistem Koordinat Sensor (mdpi open access, 2020).

2.1 *Extended Kalman Filter*

Data yang didapat dari sensor IMU berupa nilai ketinggian dalam satuan cm , akan ditampilkan pada software desktop menggunakan Visual Basic. Nilai ketinggian tersebut terlebih dahulu diproses menggunakan algoritma Extended Kalman Filter (EKF). Sebelum EKF, Kalman Filter sederhana hanya dapat diaplikasikan pada sistem linier [11][12]. Tetapi pada dunia nyata terdapat berbagai macam sistem nonlinier baik pada model sistem atau model pengukuran atau keduanya. Oleh karena itu dikembangkanlah metode EKF yang dapat digunakan untuk mengestimasi model sistem nonlinier dengan kondisi model sistem dan model pengukuran menjadi fungsi turunan dari variabel keadaan. Fungsi turunan dari variabel keadaan membentuk matriks Jacobi. Sama halnya dengan KF, estimasi EKF dilakukan dengan dua tahapan [13][14] yaitu dengan cara memprediksi variabel keadaan berdasar sistem dinamik yang disebut tahap prediksi (time update) dan tahap koreksi (measurement update) terhadap data-data pengukuran untuk memperbaiki hasil estimasi. Persamaan yang digunakan dapat ditunjukkan dalam Tabel I.



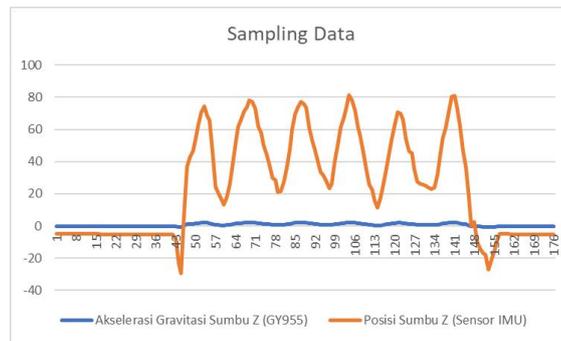
TABEL I: PERSAMAAN UPDATE FILTER KALMAN

<i>Time Update (Prediksi)</i>	<i>Measurement Update (Koreksi)</i>
$x_k^- = x_{k-1}$	$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R}$
$P_k^- = P_{k-1}$	$x_k = x_k^- + K_k(z_k - x_k^-)$
	$P_k = (1 - K_k)P_k^-$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kalibrasi Sensor IMU GY955

Langkah pertama adalah pengambilan data sensor dan konversi kedalam satuan cm. untuk mendapatkan pembacaan ketinggian gelombang laut yang akurat maka diperlukan proses kalibrasi atau menyesuaikan keluaran sensor GY955 yaitu akselerasi gravitasi sumbu Z dengan ketinggian yang sudah diketahui nilai benarnya. Sebagai pembanding digunakan smartphone dengan fasilitas IMU sensor yang sudah tertanam didalam smartphone tersebut. Selanjutnya dilakukan pengambilan sampling data untuk mencari gain atau faktor pengali supaya nilai keluaran sensor GY955 yang sebelumnya menggunakan satuan akselerasi m/s² menjadi cm. berikut adalah pengambilan sampling data untuk sensor GY955 dan sensor IMU bawaan smartphone yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Pengambilan Sampling Data Untuk Keperluan Kalibrasi

Masing – masing data posisi sumbu Z sensor IMU yang sudah dalam satuan cm, selanjutnya dibagi dengan data akselerasi gravitasi sumbu Z sensor GY955. Hasil pembagian dari kedua data tersebut kemudian dicari rata – rata hasil pembagian. Rata – rata hasil pembagian pada penelitian ini digunakan sebagai gain atau faktor pengali supaya keluaran sensor GY955 berada dalam satuan cm. Rata - rata hasil pembagian pada penelitian ini adalah 35, sehingga untuk setiap pembacaan data sensor GY955 untuk sumbu Z akan dikalikan dengan 35 supaya hasil keluaran sensor dalam satuan cm. Gambar 3 berikut adalah tangkapan layer penambahan gain pada sisi software:

```
data3 = Val(simpan(2) 'z gravitational acc
data3d = (data3 * 35) 'height conv
data4 = Val(simpan(3)) 'pv power
data5 = Val(simpan(4)) 'battery percentage
```

Gambar 3: Penambahan Gain Pada Listing Program

3.2 Penerapan dan Evaluasi Extended Kalman Filter (EKF)

Untuk membangun sistem monitoring ketinggian gelombang laut berbasis sensor GY955, berikutnya harus diketahui terlebih dahulu karakteristik sensor IMU GY955. Berdasarkan referensi dari NDBC (*National Data Buoy Center*) Amerika Serikat, kelemahan utama sensor IMU adalah karakteristik data yang memiliki ripple atau riak ketika diterapkan untuk pengukuran ketinggian gelombang laut, sehingga informasi ketinggian puncak atau ketinggian



rata – rata gelombang laut menjadi bias. Kelemahan tersebut mampu diminimalkan melalui filter sinyal, salah satunya adalah Extended Kalman Filter (EKF). Sebagai langkah awal untuk menerapkan filter Kalman, pertama perancangan filter kalman dilakukan sebelum tahap simulasi menggunakan *software* MATLAB 2018a. Data yang digunakan hanya terdiri dari 1 variabel yaitu ketinggian gelombang laut yang didapatkan dari parameter akselerasi gravitasi sumbu Z (*Z gravitational acceleration*) sensor GY955 yang telah dikonversi kedalam satuan meter. Pertama pencarian model representatif dilakukan dengan menggunakan bentuk umum model [15] sebuah plant seperti pada (1):

$$x_k = A \cdot x_{k-1} + B u_k + w_k \tag{1}$$

Karena data yang digunakan adalah dalam bentuk sinyal 1 dimensi saja maka perhitungan pemodelan pada penelitian ini bersifat numerik bukan dalam bentuk matriks. Pada aplikasi sistem monitoring seperti yang diterapkan untuk mengukur ketinggian gelombang laut, tidak memiliki sinyal kontrol atau u_k sehingga dapat diasumsikan bahwa $u_k = 0$. Sehingga praktis persamaan untuk mencari x_k menjadi lebih sederhana dimana $x_k = A \cdot x_{k-1} + w_k$. Karena sinyal ketinggian gelombang adalah dalam bentuk konstanta sehingga $A = 1$ dan didapatkan:

$$x_k = x_{k-1} + w_k \tag{2}$$

Pada dasarnya sinyal ketinggian gelombang yang didapatkan melalui pembacaan sensor adalah berupa informasi utama yang disertai noise atau gangguan, dimana gangguan dapat bersifat normal (memiliki distribusi normal atau gaussian) maupun fluktuatif. Dengan asumsi gangguan yang diterima adalah bersifat normal atau gaussian, pada penelitian ini nilai parameter $H = 1$. Sehingga didapatkan persamaan akhir untuk sinyal keluaran sensor adalah:

$$z_k = H \cdot x_k + v_k \tag{3}$$

$$z_k = x_k + v_k \tag{4}$$

Sebagai contoh terdapat sampel pembacaan sensor ketinggian gelombang laut z_k dapat ditunjukkan pada Tabel II sebagai berikut:

TABEL II : SAMPEL PEMBACAAN SENSOR KETINGGIAN GELOMBANG LAUT

Waktu(s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ketinggian (m)	0.39	0.5	0.48	0.29	0.25	0.32	0.34	0.48	0.41	0.45

Langkah awal untuk mendapatkan hasil filter kalman (EKF) yang optimal dari data pada tabel tersebut, terlebih dahulu ditentukan kondisi awal (initial condition) untuk parameter $k = 0$. Pada saat $k = 0$ maka nilai $x_0 = 0$ dan $P_0 = 1$. P_0 bernilai tidak sama dengan 0, karena jika $P_0 = 0$ maka diasumsikan tidak ada noise pada saat proses pengukuran. Asumsi ini dapat mengakibatkan hasil filter kalman bernilai 0 atau tidak dapat meredam noise dengan optimal. Sehingga nilai P_0 harus dipilih dengan konstanta selain bilangan 0. Selanjutnya berdasarkan kondisi awal tersebut dan persamaan update filter kalman dengan z_k adalah hasil pengukuran ketinggian gelombang disertai noise, dan asumsi nilai simpangan baku untuk noise $R = 0.1$, maka dapat dihitung nilai hasil filter kalman x_k Tabel III.

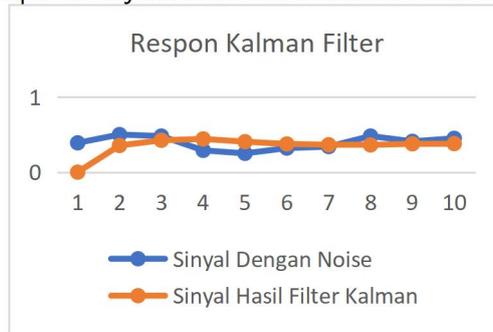
TABEL III : PROSES PERHITUNGAN FILTER KALMAN

K	z_k	x_{k-1}	P_k^-	Time Update	Measurement Update	x_k	P_k
1	0.390	0	1	$x_k = x_{k-1} = 0$ $P_k^- = P_{k-1} = 1$	$K_k = 1/(1+0.1)$ $K_k = 0.909$ $x_k = 0+0.909(0.390-0)$ $x_k = 0.355$ $P_k = (1-0.909).1$ $P_k = 0.091$	0.355	0.091
2	0.500	0.355	0.091	$x_k = x_{k-1} = 0.355$ $P_k^- = P_{k-1} = 0.091$	$K_k = 0.091/(0.091+0.1)$ $K_k = 0.476$ $x_k = 0.355+0.476 (0.500-0.355)$ $x_k = 0.424$ $P_k = (1-0.476).0.091$	0.424	0.048



	$P_k = 0.048$					
3	0.480	0.424	0.048		0.442	0.032
4	0.290	0.442	0.032		0.405	0.024
5	0.250	0.405	0.024		0.375	0.020
6	0.320	0.375	0.020		0.365	0.016
7	0.340	0.365	0.016		0.362	0.014
8	0.480	0.362	0.014		0.377	0.012
9	0.410	0.377	0.012		0.380	0.011
10	0.450	0.380	0.011		0.387	0.010

Dan jika diplot dalam bentuk grafik dapat ditunjukkan oleh Gambar 4 berikut ini:



Gambar 4: Respon EKF terhadap sampel sinyal pembacaan sensor dengan R noise = 0.1

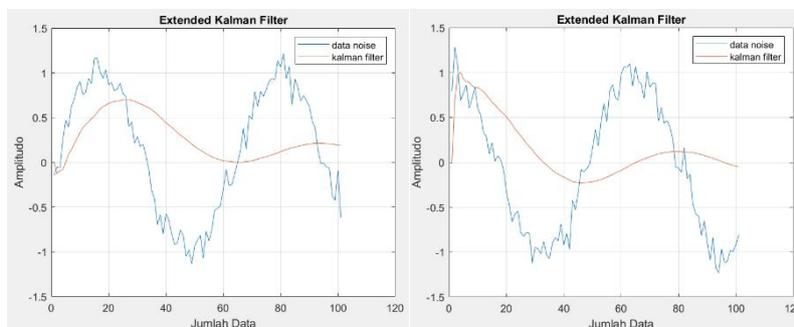
Gambar 4 menunjukkan grafik respon EKF yang lebih landai (smooth), pada penggunaan sensor – sensor yang bersifat responsif akan sangat membantu karena pada dasarnya sensor yang responsif memiliki peluang riak yang lebih besar dan rawan noise seperti halnya pada sensor ketinggian gelombang laut GY955 yang digunakan pada penelitian ini.

Sebelum diaplikasikan ke hardware terlebih dahulu tahap simulasi dilakukan dengan memanfaatkan signal generator. Simulasi pada penelitian ini menggunakan sinyal sinusoidal yang telah ditambahkan dengan gangguan dengan distribusi normal atau noise gaussian. Setelah deklarasi signal generator dan inisialisasi telah dilakukan selanjutnya adalah memasukkan persamaan EKF menggunakan struktur for sebagai berikut:

```

% initial condition
xk = 0;
pk = 1;

% extended kalman filter
for i = 1:n
    kk = pk / (pk + R);
    xkp = xk + (kk * (zk(i) - xk));
    pkp = (1 - kk) * pk;
    zkp(i, 1) = xkp;
    xk = xkp;
    pk = pkp;
end
    
```



Gambar 5: Respon EKF terhadap sampel sinyal cosinus dengan noise (atas) dan terhadap sampel sinyal sinus dengan noise (bawah)



Berdasarkan gambar 5 untuk signal generator cosinus didapatkan simpangan baku sinyal dengan noise = 0.7413 dan simpangan baku sinyal hasil EKF = 0.335. Sedangkan signal generator sinus didapatkan simpangan baku sinyal dengan noise = 0.680 dan simpangan baku sinyal hasil EKF = 0.239. Hal ini menunjukkan baik untuk pembangkitan sinyal cosinus dan sinus menggunakan gaussian noise, Extended Kalman Filter mampu meredam noise dengan optimum dibuktikan melalui nilai simpangan baku yang lebih kecil atau dapat dikatakan lebih stabil.

Langkah terakhir adalah menerapkan struktur for EKF pada mikrokontroller. Mikrokontroller yang digunakan pada penelitian ini adalah Arduino Nano, struktur EKF seperti yang telah ditunjukkan pada script M-File MATLAB disalin untuk diaplikasikan bersamaan dengan perangkat elektronik lainnya. Komponen sistem elektrik pada penelitian ini terdiri atas 4 komponen, diantaranya:

1. Sensor GY955
2. Mikrokontroller Arduino Nano
3. Modul Komunikasi Serial Xbee
4. Baterai dan Panel Surya

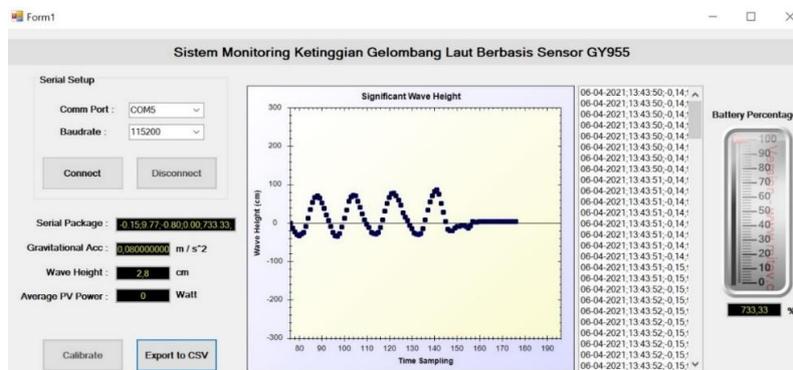
Keseluruhan pembangkitan sistem elektronik mendapatkan daya dari baterai LiPo 5000 mAh yang melalui Buck Converter untuk menyesuaikan tegangan yang dibutuhkan oleh controller, sensor dan modul komunikasi. 4 Komponen tersebut diletakkan kedalam buoy berbentuk bola pejal dengan pemberat di bagian bawah bola seperti dokumentasi pada Gambar 6 berikut ini:



Gambar 6: Dokumentasi Buoy Dengan Sistem Monitoring Ketinggian Gelombang Laut

Hasil pembacaan sensor GY955 yang sudah dikonversi dalam satuan cm dikirim melalui komunikasi serial I2C yang dimiliki Arduino Nano, pada dasarnya sensor ini memiliki kemampuan untuk melakukan pembacaan akselerasi gravitasi 3 sumbu yaitu akselerasi sumbu X, sumbu Y dan Z. Sedangkan akselerasi yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah akselerasi gravitasi sumbu Z yang merupakan pergerakan naik turun pada sensor, sehingga data inilah yang diproses menggunakan Extended Kalman Filter. Data sumbu Z yang telah melalui proses filter akan dikirim secara wireless menggunakan modul Xbee untuk selanjutnya ditampilkan pada interface visual studio.

Gambar 7 di bawah ini menunjukkan pengambilan data pada saat simulasi gelombang laut dengan ketinggian puncak gelombang (peak amplitude) 100 cm yang diberikan pada periode berulang yaitu tiap 20 detik. Terlihat bahwa EKF mampu meredam noise dengan baik dan mampu mengikuti pola ketinggian gelombang laut aktual dengan selisih sebesar ± 5 cm. Dan berikut adalah dokumentasi proses pengambilan data menggunakan software visual studio:



Gambar 7: Dokumentasi Pembacaan Ketinggian Gelombang Laut



4. KESIMPULAN

Telah dirancang sistem monitoring ketinggian gelombang laut menggunakan sensor IMU GY955. Sensor terhubung dengan mikrokontroler Arduino melalui komunikasi serial I2C, data yang digunakan adalah data akselerasi gravitasi sumbu Z yang dikonversi kedalam satuan centimeter (cm) dengan menggunakan perbandingan ketinggian yang sudah diketahui. Dari hasil perbandingan tersebut ditemukan gain sebagai faktor pengali untuk keperluan konversi. Data yang sudah terkonversi dengan satuan cm dikirim menuju Personal Computer (PC) melalui komunikasi serial secara wireless menggunakan modul komunikasi xbee. Untuk mendapatkan akurasi pembacaan sensor yang optimal pada penelitian ini turut menggunakan filter kalman. Berdasarkan simulasi dengan sinyal sinus dan cosinus generator yang diberi noise dengan distribusi normal, penelitian ini mampu menunjukkan bahwa penggunaan filter pada sensor GY 955 secara simulasi mampu mendapatkan simpangan baku sebesar: 0.239 cm dari yang sebelumnya : 0.680 cm untuk sinyal sinus dengan noise gaussian. Dan mendapatkan simpangan baku sebesar 0.335 cm dari yang sebelumnya = 0.7413 untuk sinyal cosinus dengan noise gaussian. Sedangkan pada saat pengambilan dengan ketinggian puncak gelombang (peak amplitude) 100 cm yang diberikan pada periode berulang yaitu tiap 20 detik. Terlihat bahwa sistem monitoring pada penelitian ini mampu meredam noise dengan baik dan mampu mengikuti pola ketinggian gelombang laut aktual dengan selisih sebesar ± 5 cm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. S. Suharyo, "Rancang Bangun Alat Pengukur Gelombang Permukaan Laut Presisi Tinggi (A Prototype Design)", *Applied Technology and Computing Science Journal*, vol. 1(1), pp. 18-29, Dec. 2018.
- [2] Azhari, M. I. Jumarang, and A. Muid, "Pembuatan Prototipe Alat Ukur Ketinggian Air Laut Menggunakan Sensor Inframerah Berbasis Mikrokontroler Atmega 328", *POSITRON*, vol. 4(2), pp. 64-70, 2014.
- [3] M. Yakob, N. Sagita, and R. A. Putra, "Rancang Bangun Alat Pendeteksi Ketinggian Permukaan Air Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno", *JURUTERA-Jurnal Umum Teknik Terapan, Aceh*, vol. 6(1), pp. 10-13, 2019.
- [4] Y. Zhang, L. Qi, J. Dong, Q. Wen, and L. Mindong, "Data Processing Based on Low Precision IMU Equipment to Predict Wave Height and Wave Period". *International Conference on Data Intelligence and Security (ICDIS)*, USA, vol. 2, pp.103-107, 2017.
- [5] R. A. Darmawan, "Perencanaan Lintasan Pesawat Udara Nir Awak (PUNA) dengan Menggunakan Pythagorean Hodograph", Bachelor Degree Thesis, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia, 2010.
- [6] A. Gumilar, "Estimasi Peluru Kendali pada Lintasan Menggunakan Unscented Kalman Filter", Bachelor Degree Thesis, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia, 2011.
- [7] J. M. Jose, "Performance Comparison of Extended and Unscented Kalman Filter Implementation in INS-GPS Integration", Master Degree Thesis, Czech Technical University, Prague, 2009.
- [8] R. Kleinbauer, "Kalman Filtering Implementation with Matlab", OPUS - Publication Server of the University of Stuttgart, Helsinki, 2004. DOI : <http://dx.doi.org/10.18419/opus-3692>
- [9] D. Luknanto, "Model Matematika", 1st ed, Yogyakarta, Indonesia: Universitas Gadjah Mada, 2003.
- [10] S. Pancahayani, "Estimasi Lintasan Misil dengan Metode Ensemble Kalman Filter (EnKF)", bachelor Degree Thesis, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia, 2011.
- [11] K. D. Purnomo, "Aplikasi Metode Ensemble Kalman Filter pada Model Populasi Plankton", Master Degree Thesis, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia, 2008.
- [12] Subchan and R. Zbikowski, "Computational optimal control: Tools and practice. 1.", United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009.
- [13] E. A. Wan and R. V. D. Merwe, "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation", in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No. 00EX373)*, 2000, p.153-158.
- [14] G. Welch and G. Bishop. "An Introduction to The Kalman Filter", Chapel Hill: University of Carolina, 1997.
- [15] R. D. Wicaksono, "Penerapan Extended Kalman Filter Untuk Mendeteksi Waktu Terjadinya Kerak pada Alat Penukar Panas", Bachelor Degree Thesis, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia, 2010.

