



## Perancangan Sistem Pintar Prediksi Trajektori Pesawat Menggunakan Data ADS-B dengan Metode Kalman Filter untuk Mencegah Collision

### *Building Smart System Aircraft Trajectory Prediction Based on ADS-B Data Using Kalman Filter for Preventing Collision*

**Andri Bharata**

Perum LPPNPI (Airnav Indonesia)

andri.bharata@airnavindonesia.co.id , andrihtp@gmail.com

#### INFO ARTIKEL

##### Histori Artikel:

Diterima: 23 November 2017

Direvisi: 12 Desember 2017

Disetujui: 30 Desember 2017

Dipublikasi online: 31 Des 2017

##### Keywords:

ADS-B, ATC, collision, kalman filter, near miss, prediction, Smart system, surveillance.

##### Kata kunci:

ADS-B, ATC, collision, kalman filter, near miss, prediksi, sistem pintar, surveillance.

#### ABSTRACT / ABSTRAK

*Safety is the main aspect that the most concerned in the air transportation industry. Two of the elements that play important role in order to maintain aviation safety are the ability of ATC personnel in navigating the aircrafts over the Indonesia's air space and the availability of air navigation facilities so that an effective and safe air traffic management can be achieved.*

*The ability of ATC is absolutely a key factor in aviation business. The competent one, not only required to have decent knowledge and able to navigate and guide the aircrafts, but also have to be supported by adequate navigation system and facilities. As for enhancing the level of safety, smart system is offered as a tool to aid the ATC in making a decision to prevent the collision in the air.*

*Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) is one of the air navigation instruments which have high accuracy in surveilling the aircrafts movement. The information that are retrieved from ADS-B, such as positional data (latitude, longitude and altitude) and speed, can assist the ATC to analyze the level of safety as well as the level of density of aircrafts in certain area.*

Dalam mendukung keselamatan penerbangan, ATC yang bertugas di darat, belum dilengkapi sebuah sistem peringatan bahaya seperti halnya TCAS yang digunakan di pesawat. Sama halnya seperti TCAS, sistem pintar ini akan memberi peringatan dini untuk mencegah terjadinya tabrakan. Selain itu, sistem ini akan memberi peringatan berdasarkan hasil prediksi data live pesawat, bukan ketika sudah pada posisi kemungkinan tabrakan seperti halnya TCAS.

Sistem pintar prediksi trajektori merupakan sebuah sistem yang berfungsi sebagai sistem bantuan yang dapat digunakan oleh ATC ketika sedang mengawasi lalu lintas udara. Sistem pintar ini memprediksi posisi pesawat selama beberapa waktu ke depan. Dengan hasil prediksi posisi oleh sistem ini, akan diberikan early warning kepada ATC, jika prediksi posisi dua pesawat atau lebih memungkinkan untuk terjadi tabrakan (collision) atau near miss. Dengan adanya peringatan prediksi, ATC dapat mencegah kemungkinan tabrakan dengan lebih cepat.

Sistem pintar menggunakan data ADS-B, yang merupakan salah satu fasilitas navigasi penerbangan karena memiliki tingkat akurasi data yang tinggi. Data ADS-B tersebut, diolah menggunakan metode Kalman Filter untuk menghasilkan prediksi trajektori dengan tingkat error yang kecil. Kalman filter sendiri banyak digunakan untuk mengolah dan memprediksi data-data pergerakan yang linear, seperti pergerakan pesawat, pergerakan manusia, pergerakan angin dan yang lainnya.

## PENDAHULUAN

Situs *Aviation* <https://aviation-safety.net> mencatat setidaknya ada 361 kejadian *mid-air collision* (bertabrakan di udara) dan ribuan kejadian insiden *near miss* (hampir bertabrakan) sejak tahun 1922 hingga 2015, baik untuk penerbangan sipil maupun militer. Oleh karena itu, keselamatan penerbangan merupakan aspek utama yang perlu diperhatikan dalam dunia penerbangan.

Untuk mencegah terjadinya *mid-air collision* dan *near miss*, adalah kecakapan ATC dan ketersediaan peralatan navigasi yang baik yang sangat mempengaruhi. Selain kehandalan dan peralatan navigasi, ATC juga sangat membutuhkan informasi penerbangan yang akurat dan terbaru.

Pada saat ini, perkembangan sistem anti *collision* masih hanya diterapkan pada pesawat yaitu TCAS. TCAS adalah sistem peringatan pada pesawat yang dirancang untuk mengurangi kejadian tabrakan antar pesawat. Sementara untuk perangkat di darat, belum ada sistem yang digunakan oleh ATC yang memungkinkan ATC untuk melihat adanya kemungkinan tabrakan. Padahal, ATC juga memegang peranan yang cukup penting, karena tugas ATC memantau pergerakan pesawat di udara dan memiliki data pergerakan pesawat.

Dilatar belakang kejadian tersebut, penelitian ini menawarkan sistem pintar (smart system) untuk membantu seorang *Air Traffic Controller* (ATC). Sistem pintar ini akan menampilkan peringatan tabrakan dalam bentuk prediksi trajektori pesawat. Prediksi trajektori akan ditampilkan beberapa saat ke depan dengan informasi grafik, sehingga seorang ATC dapat mengambil keputusan dengan cepat dan tepat apabila terjadi kemungkinan dua pesawat akan mengalami tabrakan.

Jika TCAS memberi peringatan apabila jarak antar pesawat telah melewati batas minimum, maka sistem pintar ini dirancang untuk memberi peringatan bahkan sebelum pesawat berada di posisi tersebut, karena hasil sistem merupakan prediksi posisi beberapa saat ke depan.

Ketika penulisan, pembahasan serta analisis penelitian ini, perlu disampaikan batasan-batasan masalah yakni:

1. Pesawat yang diamati adalah pesawat yang sedang bergerak di udara
2. Data pergerakan pesawat diudara berasal dari data ADS-B yang disimpan (data ADS-B Airtav Indonesia)
3. Data yang digunakan adalah data recording ADS-B (Asterix CAT21), belum menggunakan *data live* (data operasional)
4. Data ADS-B yang dianalisis adalah data ADS-B per pesawat, sehingga tidak memperlihatkan kemungkinan tabrakan.

## TINJAUAN PUSTAKA

Sesuai dengan Peraturan Keselamatan Penerbangan Sipil (P.K.P.S) Menteri Perhubungan Republik Indonesia bagian 170, tujuan dari pelayanan lalu lintas udara adalah:

1. Mencegah tabrakan antar pesawat.
2. Mencegah Tabrakan antar pesawat di area pergerakan rintangan di area tersebut.
3. Mempercepat dan mempertahankan pergerakan lalu lintas udara.
4. Memberikan saran dan informasi yang berguna untuk keselamatan dan efisiensi pengaturan lalu lintas udara.
5. Memberitahukan kepada organisasi yang berwenang dalam pencarian pesawat yang memerlukan pencarian dan pertolongan sesuai dengan organisasi yang dipersyaratkan.

Faktor yang diperlukan untuk menciptakan dan menjamin keselamatan penerbangan sipil di Indonesia yakni : kecakapan seorang ATC dalam memandu pesawat di wilayah udara Indonesia, tersedianya fasilitas peralatan navigasi yang layak, tersedianya informasi penerbangan yang terbaru untuk pihak-pihak yang membutuhkan (*airlines*, bandara, Airtav, otoritas bandara).

### Kalman Filter

Dalam proses prediksi, *noise* merupakan bagian penting yang harus diperhatikan. *Noise* yang cukup besar nilainya dapat mengganggu jalannya sistem prediksi. Oleh karena itu untuk mendapatkan sinyal sebenarnya

terpisah dari kumpulan noise, dibutuhkan teknik pemfilteran.

Persoalan pemfilteran adalah ekstraksi sinyal yang diinginkan dari noisanya. Dari sejumlah *toolbox* matematika yang dapat digunakan untuk melakukan prediksi dan pemfilteran kumpulan data dengan *noise*, Kalman Filter adalah yang paling sering digunakan.

Pada tahun 1960 R.E Kalman memperkenalkan solusi untuk masalah pemfilteran data linear dan melakukan estimasi prediksi. Kalman filter *is a set of mathematical equations that provides an efficient computational means to estimate the state of a process in a way that minimizes the mean of the squared error.*

Teknik ini sangat handal dalam melakukan konvergensi data. Biasanya, sistem pemfilteran dijelaskan dengan persamaan sistem model dan persamaan pengukuran. Ketika persamaan sistem model dan pengukuran linear, Kalman Filter dapat digunakan untuk memperkirakan vektor secara berkesinambungan.

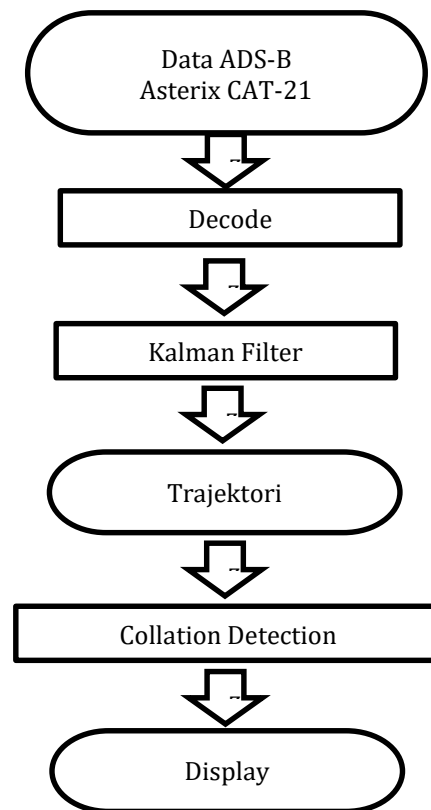
Kalman Filter biasa digunakan dalam bidang kedirgantaraan yang membutuhkan sistem kontrol yang canggih. Kalman Filter dapat digunakan untuk melakukan *Tracking* objek, sistem navigasi, filtrasi *noise* hasil pengukuran sensor, perbaikan cacat gelombang saat transmisi.

Trajektori keadaan adalah metoda untuk memprediksi perilaku sistem dan membandingkannya dengan perilaku sistem secara aktual untuk menentukan keadaan mana yang paling meyerupai keadaan sebenarnya.

## METODOLOGI

Inti dari penelitian penulis adalah memanfaatkan data yang diperoleh ADS-B, mengolah data tersebut menjadi prediksi trajektori dan mengaplikasikan prediksi trajektori tersebut untuk digunakan oleh ATC dalam memberikan peringatan dini, jika pada tampilan sistem ada prediksi yang memungkinkan terjadinya tabrakan atau near miss antar pesawat.

## Flowchart Metodologi



Data yang diperoleh dari ADS-B merupakan data asterix CAT21. Data tersebut harus di decode dahulu sehingga menjadi data yang dapat dibaca, yang berisi data longitude, latitude, altitude, speed dan heading pesawat.

Data yang berisi informasi pesawat tersebut diolah menggunakan metode kalman filter untuk menghasikan data prediksi. Data-data prediksi akan dihasilkan setiap kali pesawat melakukan perubahan posisi yang dikirim oleh ADS-B, sehingga data-data prediksi tersebut akan menampilkan prediksi trajektori pesawat.

Setiap data prediksi yang dihasilkan, akan dibandingkan dengan pesawat lainnya untuk mengetahui jarak antar pesawat apakah masih dalam batas aman atau tidak.A

Pada *display*, prediksi trajektori tersebut akan ditampilkan dalam bentuk garis prediksi trajektori, yang mana jika ada dua pesawat atau lebih, telah berjarak kurang dari separasi minimum yang ditetapkan oleh standar penerbangan internasional, diprediksi akan

tabrakan atau *near miss*, peringatan akan diberikan kepada ATC.

## 1. Metode Pengumpulan Data

### Fasilitas Peralatan Navigasi

Fasilitas peralatan navigasi merupakan sarana pendukung dalam dunia penerbangan, yang dibagi menjadi dua kelompok:

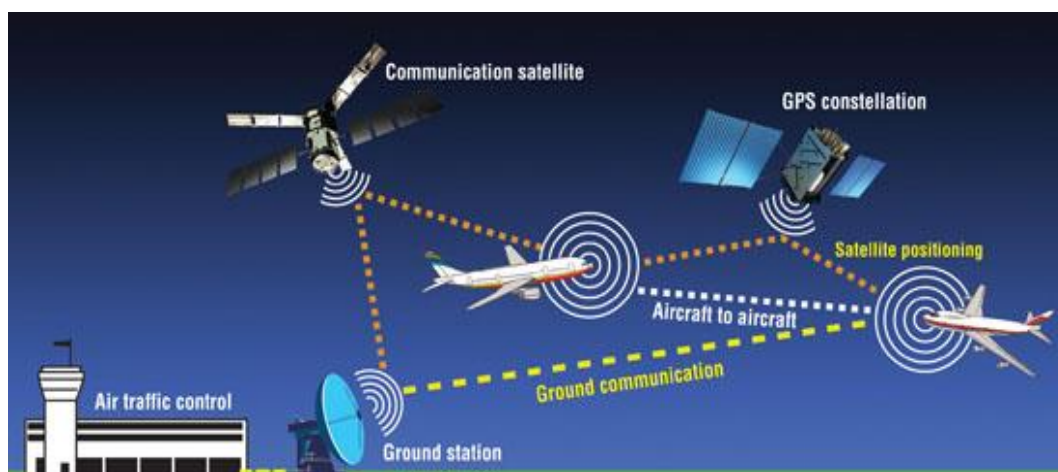
- Peralatan pengamatan penerbangan merupakan peralatan yang memberikan informasi keberadaan objek atau pesawat di udara yang terdiri dari : *primary surveillance radar* (PSR), *secondary surveillance radar* (SSR), *air traffic control automation*, ADS-B dan ADS-C, *advanced-surface movement guidance and control system* (A-SMGCS), *multilateral*, *global navigation satellite system*.
- Peralatan Rambu Udara Radio adalah fasilitas navigasi penerbangan yang berfungsi memberikan signal informasi berupa bearing (sudut) dan

jarak pesawat terhadap peralatan, yang terdiri dari : *non directional beacon* (NDB), *VHF omnidirectional range* (VOR), *distance measuring equipment* (DME).

### Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B)

ADS-B adalah teknologi pengawasan di mana pesawat terbang ditentukan posisinya melalui navigasi satelit dan secara berkala menyiarkan posisi tersebut (dua kali perdetik), sehingga memungkinkan untuk dilacak.

Informasi posisi tersebut dapat diterima oleh radar stasiun kontrol yang dapat digunakan sebagai data radar sekunder. Informasi posisi tersebut juga dapat diterima oleh pesawat lain untuk memberitahukan informasi pesawat lain di sekitarnya untuk menjaga jarak aman antar pesawat, agar mencegah terjadinya *collision* dan *near miss*.



Gambar 1. Proses data ADS-B

ADS-B merupakan sistem yang otomatis, tidak memerlukan pilot atau masukan eksternal. Proses ini hanya bergantung pada sistem dan data navigasi yang diperoleh pesawat dengan memanfaatkan satelit.

Pada saat ini, ADS-B adalah sistem navigasi yang sedang dikembangkan banyak negara-negara maju sebagai alat

pendukung sistem transportasi udara karena memiliki keunggulan yang dapat memantau pergerakan pesawat dengan lebih detail.

Ketika menggunakan data ADS-B dalam sistem, ATC dapat memantau traffic, cuaca (weather) dan informasi pesawat secara bersamaan. Selain itu, sistem ADS-B lebih efisien dilihat dari segi biaya.

## Air Traffic Controller (ATC)

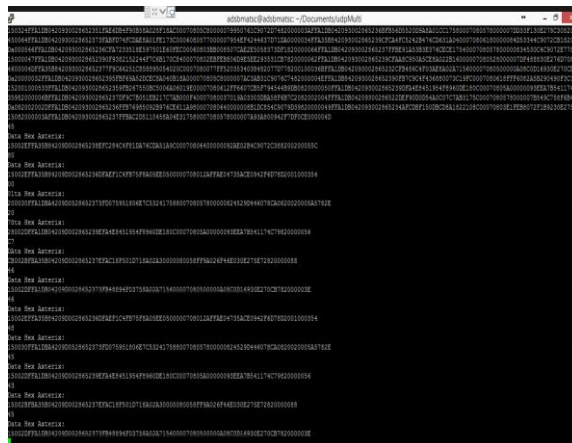
*Air traffic controller* (ATC) atau Pemandu Lalu Lintas Udara adalah profesi yang memberikan layanan pengaturan lalu lintas di udara (pesawat udara) untuk mencegah tabrakan antar pesawat dan pesawat dengan rintangan yang ada disekitarnya selama beroperasi. ATC merupakan salah satu pihak yang paling menentukan keselamatan sebuah penerbangan.

Dalam proses operasional, ATC harus didukung oleh fasilitas peralatan navigasi serta informasi penerbangan yang terbaru.

## 2. Pengolahan Data

### Sistem Pintar (smart system)

Sistem pintar adalah sistem yang membantu seorang ATC untuk memprediksikan trajektori pesawat. Data-data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data ADS-B yang meliputi posisi *latitude*, *longitude*, *altitude*, arah (heading), kecepatan (speed) pesawat dapat digunakan untuk membuat sebuah



**Gambar 2.** Sumber data ADS-B Airnav Indonesia (Asterix CAT21)

Metode kalman filter dipilih sebagai metodologi penelitian karena kalman filter dapat memprediksi sistem yang linier dan

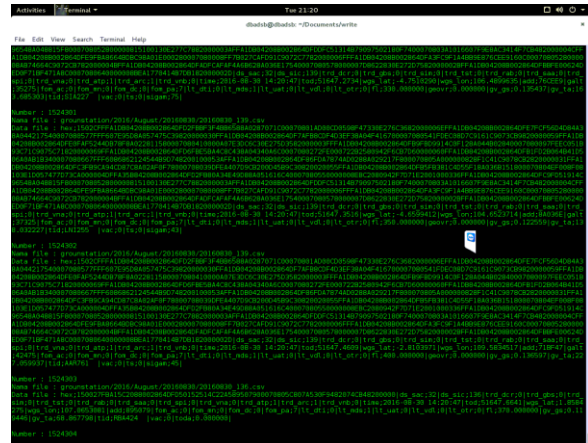
aplikasi yang memprediksi trajektori pesawat.

Aplikasi ini akan memberikan gambaran prediksi posisi trajektori sebuah pesawat beberapa waktu ke depan. Hasil prediksi dapat digunakan oleh ATC sebagai sistem pintar, untuk mencegah kemungkinan collision dan near miss.

Sistem akan menampilkan prediksi posisi pesawat dalam waktu (t) ke depan, sehingga ketika ATC melihat adanya kemungkinan terjadinya *collision* atau *near miss*, ATC dapat mengambil langkah pencegahan awal.

## 3. Analisis Data

Aplikasi sistem pintar yang dibangun dalam penelitian ini menggunakan data ADS-B yang telah disimpan dalam format Asterix CAT21 dan telah diterjemahkan menjadi informasi *latitude*, *longitude*, *altitude*, *speed*, *heading* pesawat. Sistem pintar akan membentuk prediksi trajektori pesawat berdasarkan data ADS-B dengan menggunakan metode Kalman Filter.

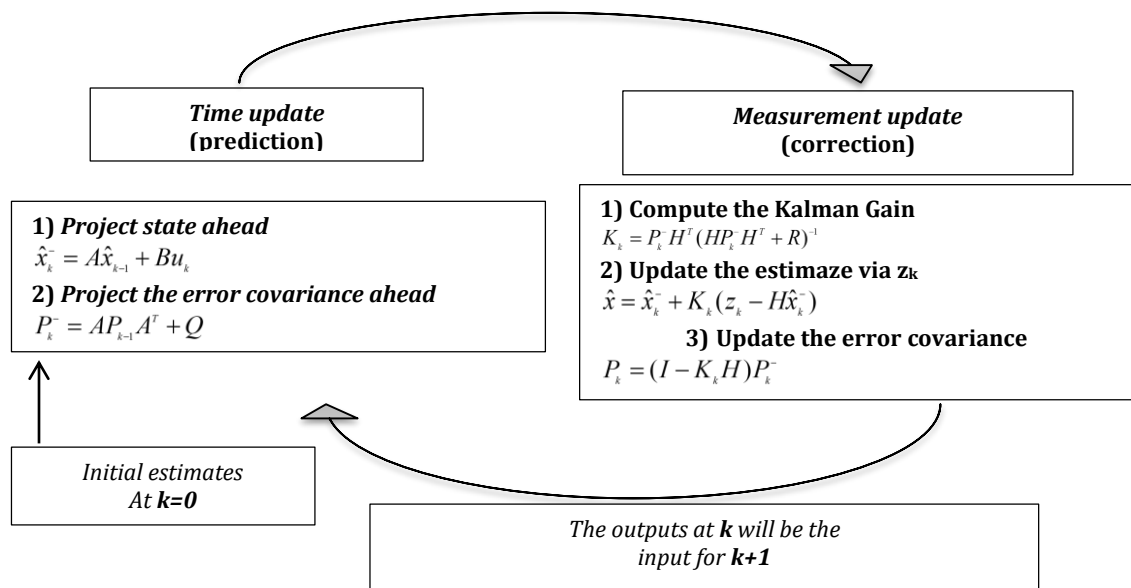


**Gambar 3.** Decode data Asterix CAT21 ke data navigasi

dapat memprediksi sistem tanpa memperhitungkan *noise* terlebih dahulu.



## Kalman Filter dan Covarian Matriks



Kalman Filter mempunyai dua tahap, yaitu tahap prediksi (predict) dan tahap pembaharuan (update). Tahap prediksi menggunakan data yang diperoleh dari keadaan waktu sebelumnya untuk mendapatkan nilai estimasi saat ini (current predict). [5]

Pada tahap pembaharuan (update), nilai pengukuran pada saat ini digunakan untuk memperbaiki prediksi sehingga estimasi keadaan selanjutnya akan lebih akurat.

### Tahapan Prediksi

<p>Persamaan kinematika:  <math>a = \Delta V / \Delta t</math>  <math>a = V_t - V_0 / t - 0</math>  <math>a = V_t - V_0 / t</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>V_t = V_0 + a\Delta t</math> </div> <p>Persamaan disubstitusi pada variable <b>x, y, z</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>V_{xt} = V_{x0} + a\Delta t</math> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>V_{yt} = V_{y0} + a\Delta t</math> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>V_{zt} = V_{z0} + a\Delta t</math> </div> <p><b>a</b> (percepatan),  <b>V<sub>t</sub></b> (kecepatan akhir),  <b>V<sub>0</sub></b> (kecepatan awal)</p>	<p><math>\bar{v} = V_t + V_0 / 2</math>  <math>\bar{v} = \Delta V / \Delta t = X_t - X_0 / t - 0</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>X = X_0 + V_t</math> </div> <p><math>X_t = X_0 + (\frac{V_t + V_0}{2})\Delta t</math>  <math>X_t = X_0 + (\frac{V_0 + a\Delta t + V_0}{2})\Delta t</math>  <math>X_t = X_0 + 2V_0 \frac{\Delta t}{2} + \frac{1}{2}a\Delta t^2</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>X_t = X_0 + V_{0x}\Delta t + \frac{1}{2}ax\Delta t^2</math> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>Y_t = Y_0 + V_{0y}\Delta t + \frac{1}{2}ay\Delta t^2</math> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> <math>Z_t = Z_0 + V_{0z}\Delta t + \frac{1}{2}az\Delta t^2</math> </div> <p>Persamaan disubstitusi pada variable <b>x, y, z</b></p>
---	--

Persamaan kinematika ke rumus Kalman Filter (dengan 3 variabel x,y,z).

Dimana:

**x** =posisi *latitude*

**y** =posisi *longitude*,

**z** = posisi *altitude*

$$X_{t+1} = X_0 + V_{0x}t + \frac{1}{2}axt^2$$

$$Y_{t+1} = Y_0 + V_{0y}t + \frac{1}{2}ayt^2$$

$$Z_{t+1} = Z_0 + V_{0z}t + \frac{1}{2}azt^2$$

$$V_{xt+1} = V_{x0} + ax\Delta t$$

$$V_{yt+1} = V_{y0} + ay\Delta t$$

$$V_{zt+1} = V_{z0} + az\Delta t$$

Rumus prediksi awal (predicted state):

$$X_{t+1} = AX + B\mu t + Wt$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ax \\ ay \\ az \end{bmatrix} + Wt$$

$$P_{t+1} = AP_t A^T + Q_{t+1} \quad (1)$$

Dimana  $P_t$  covarians matriks pada *current state*

$$P_t = \begin{bmatrix} \alpha^2 & \alpha\sigma_x & \alpha\sigma_y & \alpha\sigma_z & \alpha\sigma_{x_x} & \alpha\sigma_{x_y} & \alpha\sigma_{x_z} \\ \alpha\sigma_x & \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y & \sigma_x\sigma_z & \sigma_x\sigma_{x_x} & \sigma_x\sigma_{x_y} & \sigma_x\sigma_{x_z} \\ \alpha\sigma_y & \sigma_y\sigma_x & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z & \sigma_y\sigma_{x_x} & \sigma_y\sigma_{x_y} & \sigma_y\sigma_{x_z} \\ \alpha\sigma_z & \sigma_z\sigma_x & \sigma_z\sigma_y & \sigma_z^2 & \sigma_z\sigma_{x_x} & \sigma_z\sigma_{x_y} & \sigma_z\sigma_{x_z} \\ \alpha\sigma_{x_x} & \sigma_{x_x}\sigma_x & \sigma_{x_x}\sigma_y & \sigma_{x_x}\sigma_z & \sigma_{x_x}^2 & \sigma_{x_x}\sigma_{x_y} & \sigma_{x_x}\sigma_{x_z} \\ \alpha\sigma_{x_y} & \sigma_{x_y}\sigma_x & \sigma_{x_y}\sigma_y & \sigma_{x_y}\sigma_z & \sigma_{x_y}\sigma_{x_x} & \sigma_{x_y}^2 & \sigma_{x_y}\sigma_{x_z} \\ \alpha\sigma_{x_z} & \sigma_{x_z}\sigma_x & \sigma_{x_z}\sigma_y & \sigma_{x_z}\sigma_z & \sigma_{x_z}\sigma_{x_x} & \sigma_{x_z}\sigma_{x_y} & \sigma_{x_z}^2 \end{bmatrix}$$

$$P_t = \begin{bmatrix} \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_z^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_x}^2 & \sigma_{x_x}\sigma_{x_y} & \sigma_{x_x}\sigma_{x_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_y}\sigma_{x_x} & \sigma_{x_y}^2 & \sigma_{x_y}\sigma_{x_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_z}\sigma_{x_x} & \sigma_{x_z}\sigma_{x_y} & \sigma_{x_z}^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Nilai covarians antara posisi latitude, longitude dan altitude tidak saling mempengaruhi sehingga diberikan nilai 0 pada matriks. Sedangkan posisi sangat dipengaruhi variable kecepatan baik *latitude*, *longitude* dan *altitude*.

Rumus prediksi baru proses *covarians (new predicted process covariance)*

$$P_{t+1} = AP_t A^T + Q_{t+1} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_z^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_x}^2 & \sigma_{x_x}\sigma_{x_y} & \sigma_{x_x}\sigma_{x_z} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_y}\sigma_{x_x} & \sigma_{x_y}^2 & \sigma_{x_y}\sigma_{x_z} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_z}\sigma_{x_x} & \sigma_{x_z}\sigma_{x_y} & \sigma_{x_z}^2 \end{bmatrix} + Q_{t+1}$$

Menghitung Kalman Gain

$$K = \frac{P_{t+1} H^T}{H P_{t+1} H^T + R} \quad (4)$$

Hasil **observasi baru**

$$Y_k = C Y_k + Z \quad (5)$$

Prediksi hasil observasi baru (*prediction new observation*)

$$X_k = X_{t+1} + K(Y - H X_k) \quad (6)$$

Pembaharuan variabel baru (*update new state*)

$$P_{k+1} = (I - KH) P_k \quad (7)$$

Pembaharuan proses kovarians baru (*update new covariance process*)

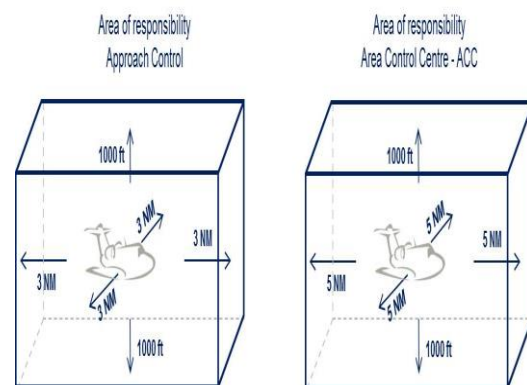
$$P_{t+1} = AP_t A^T + Q_{t+1} \quad (8)$$

**Separasi minimal berdasarkan sistem pemantau (surveillance) ATS**

Ketika sistem pemantau digunakan (radar ADS-B atau MLAT), separasi minimum berdasarkan ICAO Doc 4444 adalah 5 nm (kecuali dinyatakan lain oleh otoritas ATS). Minimum ini dapat dikurangi oleh otoritas ATS namun tidak boleh di bawah:

- 3 nm ketika kemampuan sistem pemantau di lokasi tersebut mengizinkan
- 2.5 nm antara pesawat terbang yang berhasil dibangun pada jalur pendekatan akhir yang sama dalam 10 nm ambang batas landasan pacu. Sejumlah kriteria tambahan harus dipenuhi untuk menerapkan minimum pemisahan ini (dijelaskan secara rinci dalam ICAO Doc 4444, 8.7.3.2 b).

Separasi minimum berdasarkan sistem radar ADS-B atau MLAT yang diterapkan harus ditentukan oleh otoritas ATS berdasarkan peralatan yang digunakan. Oleh karena itu, separasi minimum pemisahan 5 nm dapat diterapkan pada wilayah udara tertentu dan pada waktu-waktu tertentu.



Sistem pintar dapat mengenali kemungkinan terjadinya tabrakan (collision, near miss) berdasarkan kaidah syarat separasi minimal. Sistem akan

memberikan peringatan apabila hasil prediksi trajektori dua pesawat atau lebih kurang dari batas separasi minimal.

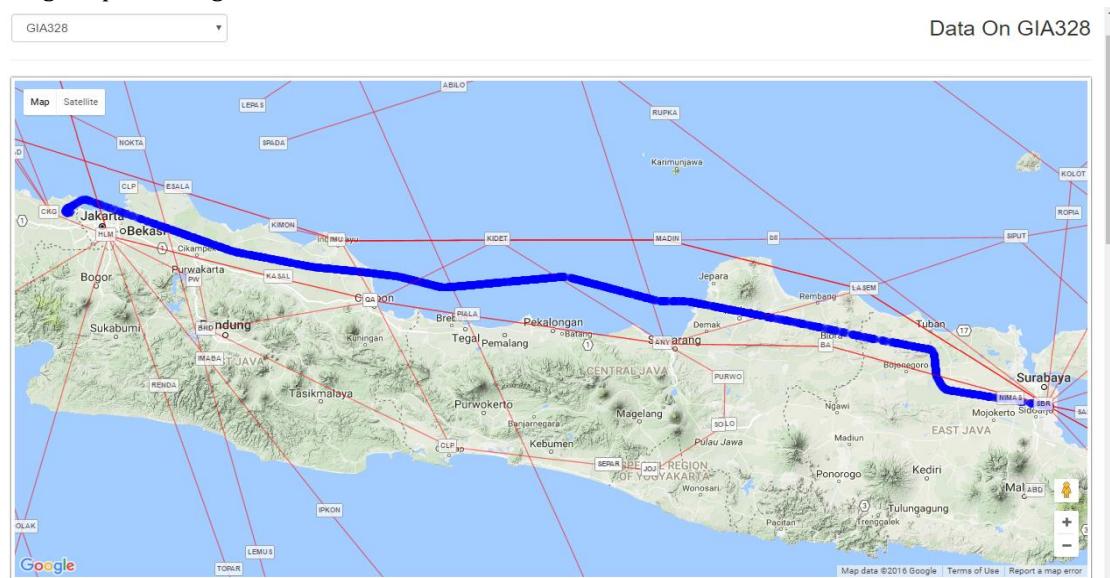
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Simulasi

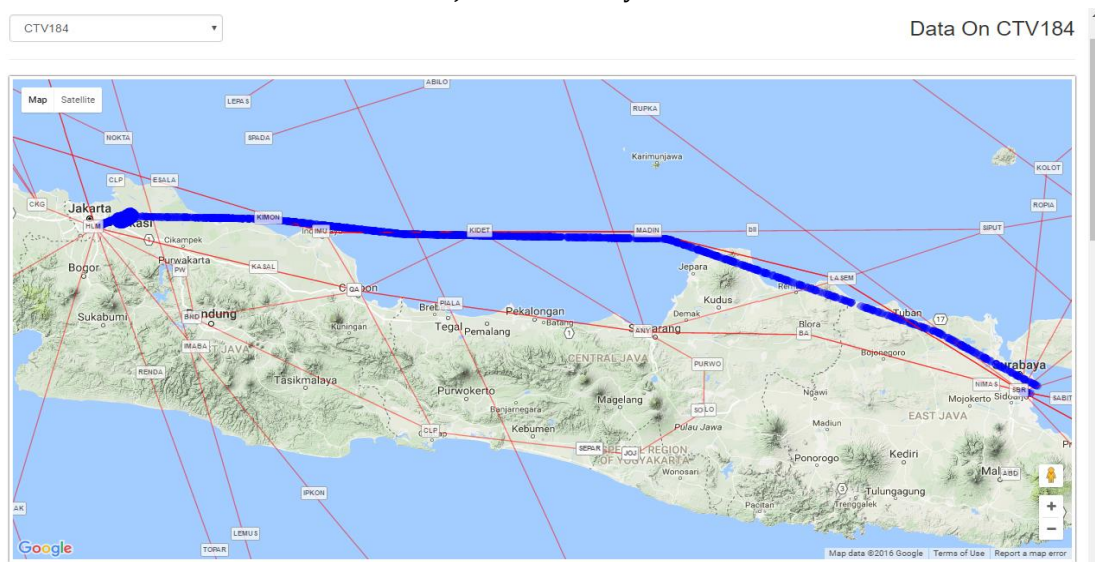
Simulasi data dilakukan pada dua pesawat dengan penerbangan Garuda GIA328 dan

Citilink CTV184 pada tanggal 30 agustus 2016.

Pada gambar di bawah, menunjukkan contoh trajektori pesawat GIA328 dan CTV184 dari ADS-B Airtav Indonesia. Sedangkan tabel 1 dan tabel 2 pada halaman lampiran, menunjukkan contoh data *real* pesawat GIA328 dan CTV184.



**Gambar 4.** Trajektori pesawat dari ADS-B Airtav Indonesia tanggal 30 Agustus 2016 GIA328 Jakarta-Surabaya



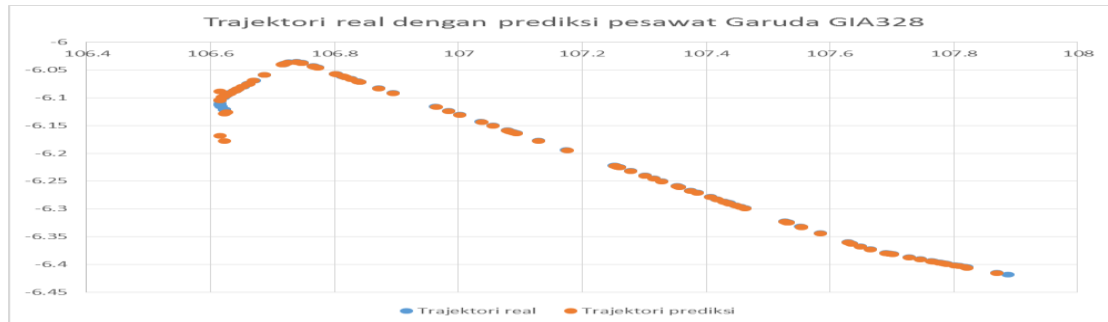
**Gambar 5.** Trajektori pesawat dari ADS-B Airtav Indonesia tanggal 30 Agustus 2016 CTV184 Surabaya-Jakarta

Semua data diproses melalui tahapan prediksi Kalman filter, sehingga diperoleh hasil kalman filter pada tabel 3 untuk GIA328 dan tabel 4 untuk CTV184 (tabel pada lampiran).

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengolahan sejumlah data sebuah pesawat, dengan menggunakan metode Kalman Filter, diperoleh hasil prediksi untuk setiap variabel latitude, longitude, altitude, speed.



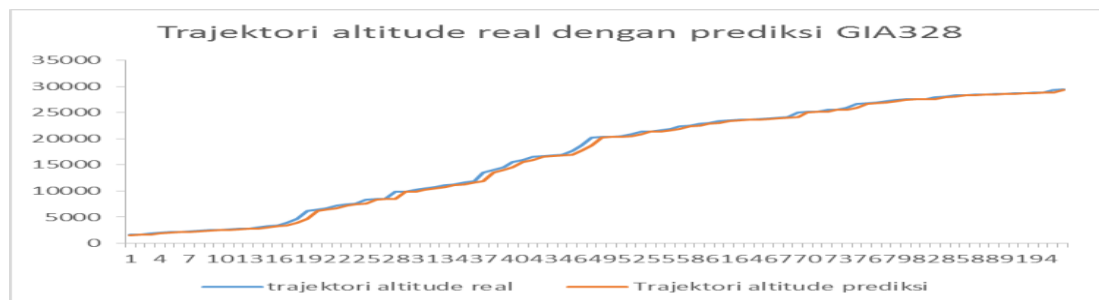
### Perbandingan trajektori real dengan prediksi



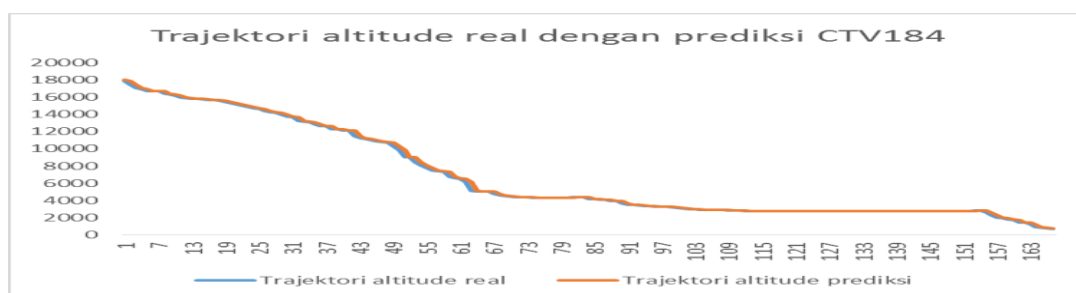
**Gambar 6.** Trajektori *real* dengan prediksi pesawat Garuda GIA328



**Gambar 7.** Trajektori *real* dengan prediksi pesawat Citilink CTV184



**Gambar 8.** Trajektori *altitude real* dengan prediksi GIA328

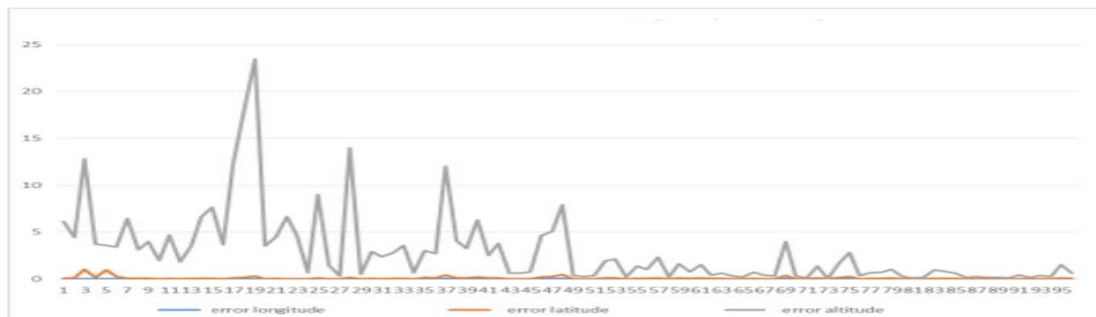


**Gambar 9.** Trajektori *altitude real* dengan prediksi CTV184

Gambar 8,9,10 dan 11 menunjukkan hasil perbandingan antara trajektori real dengan trajektori prediksi. Pada keempat gambar tersebut, trajektori real ditandai dengan titik biru, dan trajektori prediksi dengan titik oranye. Dengan hasil perbandingan yang

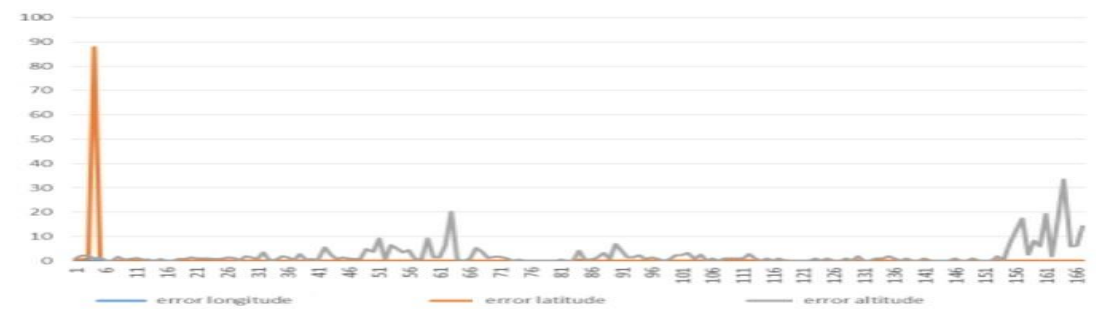
tingkat errornya sangat kecil, maka pada gambar tersebut, hampir semua titik prediksi berada tepat pada titik real, sehingga sebagian besar titik yang terlihat adalah titik data prediksi.

### Nilai error trajektori real dengan prediksi



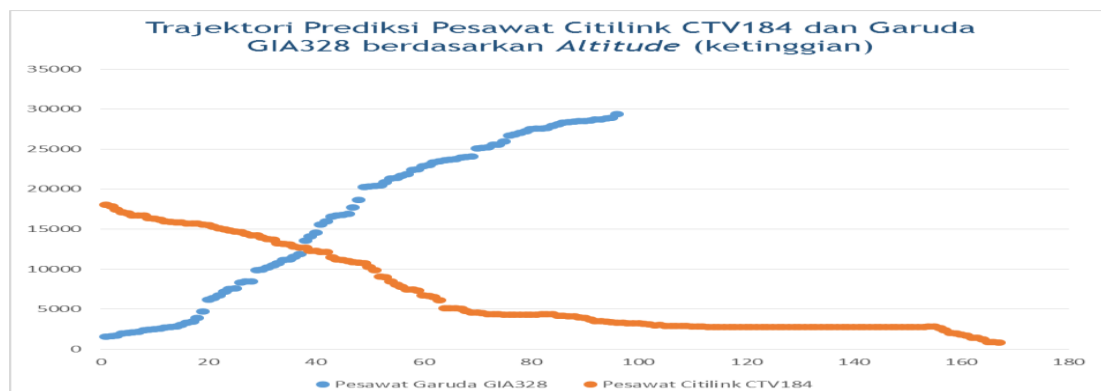
Error lon	Error lat	Error alt
0.012266	0.094627	2.9521 meter

**Gambar 10.** Nilai rata-rata *error* pesawat Garuda GIA328

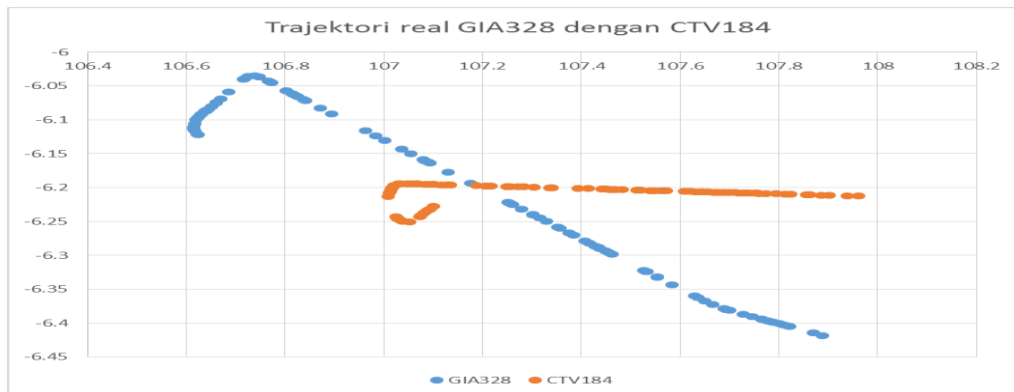


Error lon	Error lat	Error alt
0.008897	0.585793	2.180102 meter

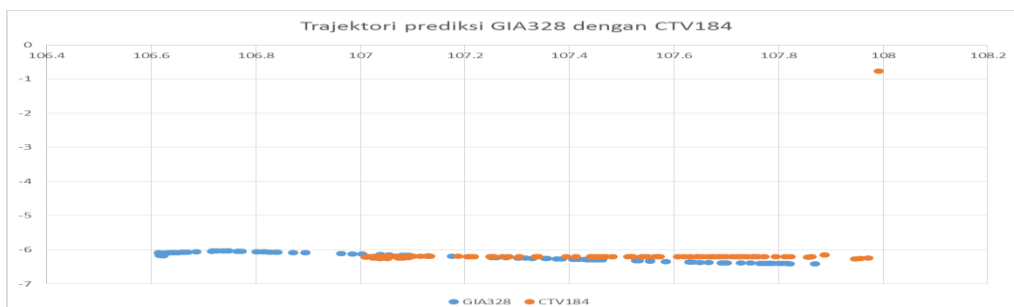
**Gambar 11.** Nilai rata-rata *error* pesawat Citilink CTV184



**Gambar 12.** Trajektori prediksi pesawat Citilink CTV184 dan Garuda GIA328 Berdasarkan *Altitude* (ketinggian)



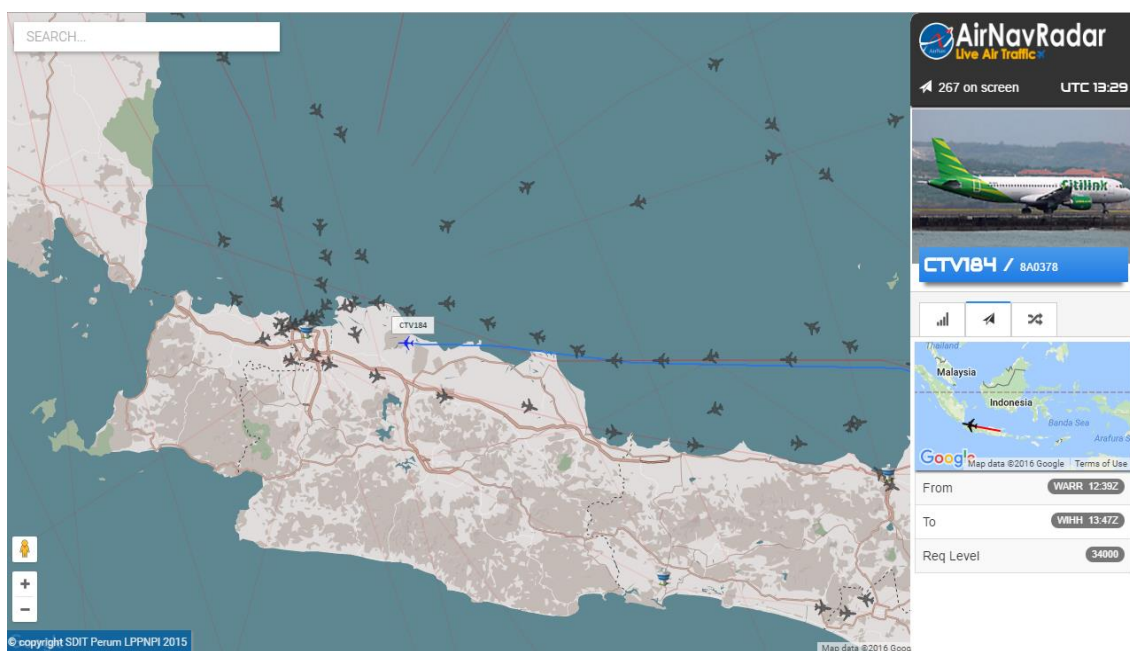
**Gambar 13.** Trajektori *real* pesawat Citilink CTV184 dan Garuda GIA328



**Gambar 14.** Trajektori prediksi pesawat Citilink CTV184 dan Garuda GIA328

Hasil prediksi tersebut menunjukkan bahwa tingkat *error* perbandingan antara data prediksi dan data sebenarnya cukup rendah, sehingga grafik menunjukkan data yang hampir sama dan metode kalman filter dapat digunakan untuk prediksi trajektori pesawat dengan data ADS-B.

Gambar 17 berikut adalah *screenshoot* Airnav Radar Indonesia yang menunjukkan aktivitas udara Indonesia secara langsung (live), dengan fokus pada area bandara Soekarno-Hatta.



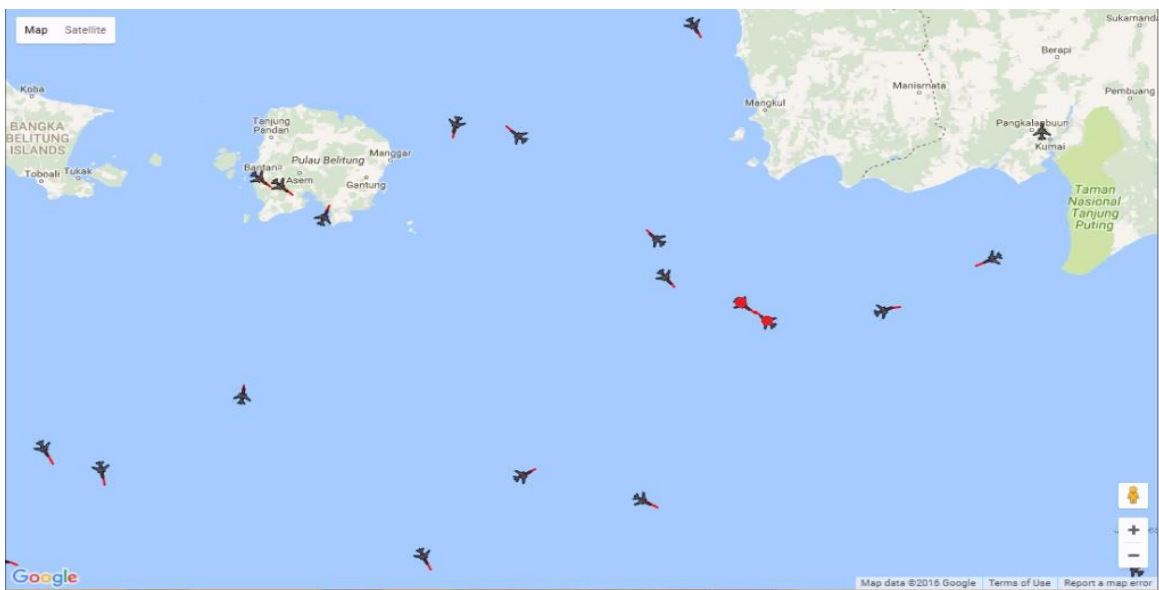
**Gambar 15.** Aplikasi Airnav radar



**Gambar 16.** Simulasi live trajektori pesawat

Gambar 18 merupakan screenshot prototype simulasi live hasil prediksi sistem pintar. Pada gambar 18 akan terlihat garis merah yang ada di ujung depan pesawat. Garis merah ini menunjukkan prediksi trajektori

pesawat beberapa detik ke depan. Artinya, jika pada keadaan normal, pesawat diprediksi akan bergerak mengikuti garis prediksi tersebut.



**Gambar 17.** Simulasi prediksi collision

Pada gambar 19, merupakan *prototype* simulasi live pergerakan pesawat yang terpantau di sekitar udara di atas laut Jawa. Terlihat dua pesawat bertanda merah. Tanda ini akan terlihat, jika jarak antar pesawat kurang dari jarak standar separasi minimum yang ditetapkan oleh peraturan penerbangan

dunia. Selain tanda merah yang akan memberikan sinyal kemungkinan bertabrakan, sistem pintar juga dapat dirancang untuk mengeluarkan bunyi peringatan agar ATC dapat mengambil langkah pencegahan secepatnya.

## KESIMPULAN

1. Data-data ADS-B dapat diolah untuk membuat prediksi trajektori pesawat selama beberapa saat ke depan, yang bertujuan sebagai sistem pembantu pemberi masukan guna menghindari terjadinya *collision* dan *near miss* ketika pesawat sedang di udara.
2. Metode Kalman Filter digunakan untuk mengolah data menjadi prediksi trajektori yang akurat.
3. Berdasarkan uji coba metode Kalman Filter terhadap sejumlah data pesawat, diperoleh data prediksi trajektori dengan tingkat perbandingan *error* yang rendah disbanding data sebenarnya.
4. Uji coba metode dengan hasil grafik di atas dilakukan pada data offline, bukan data live. Uji coba live dilakukan pada saat presentasi dengan hasil uji coba pada gambar

Uji coba juga hanya diaplikasikan pada sejumlah data dari satu pesawat sehingga tidak dapat melihat kemungkinan *collision* dan *near miss*. Untuk pengujian yang lebih akurat, dapat dilakukan pada data *live* dari setiap pesawat yang sedang di udara.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada:

1. Para direktur Airnav Indonesia atas bimbingan dan kemudahan dalam melakukan penelitian ini.
2. Kepala Divisi Teknologi Informasi Airnav Indonesia, bapak Arief Agustama yang memberi masukan untuk penelitian ini.
3. Rekan-rekan Divisi Teknologi Informasi atas dukungannya.
4. Rekan-rekan karyawan Airnav Indonesia (terutama rekan-rekan dari Direktorat Operasi) atas saran dan masukan dalam penelitian ini.
5. Istriku tercinta yang selalu memberi dukungan dan semangat.

## DAFTAR PUSTAKA

- G. Welch, G Bishop. 2011. [http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman\\_intro.pdf](http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf).
- K. V. Ramachandra. Kalman Filtering Techniques for Radar Tracking. Marcel Dekker, Inc. Madison Avenue, New York.
- M. Grewal, A. Andrews. 2008. Kalman Filtering : Theory and practice using MatLab. Hoboken, New Jersey: Wiley, pp. 133-137.
- R. A. Singer. July 1970. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets. IEEE Trans on aerospace and electronic systems, vol. 6, pp. 473-483,
- Grewal. Mohinder S. Kalman Filtering - Theory And Practice Using Matlab. Third Edition. California State University at Fullerton.
- Hsing Han. Meng. 1989. Aircraft Manuver Detection Using An Adaptive Kalman Filter. Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- Wahyu. Widada, Wahyudi. 2011. Aplikasi Tapis Kalman Pada Pengubahan Data Imu Menjadi Data Navigasi. Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN).
- Nikolay. Jetchev, Marc. Toussaint. June 17th, 2009. Trajectory Prediction: Learning to Map Situations to Robot Trajectories. Berlin Machine Learning and Robotics Group.



