

Optimasi *Mixed Integer Linear* Programming pada Penghindaran Konflik menggunakan Model *Velocity and Altitude Change*

Izdihar Farahdina, Rully Soelaiman, dan Victor Hariadi.

Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: rully@if.its.ac.id

Abstrak—Penghindaran konflik atau *Conflict Avoidance* (CA) dalam *Air Traffic Management* (ATM) memiliki kriteria konflik yaitu jika pesawat berada dalam *protected zone* (PZ). PZ adalah zona aman pesawat, yaitu 5 nm jarak horizontal minimum antara pesawat atau 1.000 ft sebagai jarak vertical minimum. Secara dasar *conflict detection* dan *resolution* (CDR) diselesaikan dengan menggunakan tiga manuver yaitu kecepatan, ketinggian, dan sudut arah terbang. Penghindaran konflik menggunakan model *Velocity and Altitude Change* (VAC) sebagai media CDR dengan menggunakan manuver ketinggian dan kecepatan sebagai solusi. Model VAC menggunakan *mixed integer linear programming* (MILP). Fungsi tujuan model VAC adalah meminimalkan perubahan ketinggian dan kecepatan agar pesawat tetap terbang sesuai *time flight*. Keluaran dari model VAC adalah ketinggian dan kecepatan pesawat yang tidak konflik dengan pesawat lainnya.

Kata Kunci—*Conflict Avoidance*, *Conflict Detection* and *Resolution*, *Mixed Integer Linear Programming*, .

I. PENDAHULUAN

Dengan ramainya pertumbuhan traffic di wilayah udara menambah kebutuhan yang harus diterapkan pada sistem *Air Traffic Control* (ATC). Penghindaran konflik pesawat pun menjadi hal yang sangat serius untuk dibahas. Dalam bidang penerbangan atau lebih spesifik dibidang *Air Traffic Management* (ATM) lebih dikenal dengan *collision-conflict avoidance* (CA). Banyak inovasi tentang *conflict detection* dan *resolution* (CDR) yang telah diberikan dengan berbagai solusi dan pilihan manuver yang berbeda. Pada dasarnya solusi CA memakai tiga manuver yaitu kecepatan, ketinggian dan sudut arah terbang.

Permasalahan utamanya adalah bagaimana membuat sistem yang dapat menyediakan prosedur normal untuk membantu kontroler dan pilot ketika tindakan yang dilakukan gagal untuk menjaga pesawat dari konflik dan solusi tidak mengganggu *time flight* yang sudah disediakan. Konflik yang dimaksud adalah suatu peristiwa di mana dua atau lebih pesawat melanggar kriteria aman yang ditetapkan. Salah satu contoh kriteria adalah 5 nm jarak horizontal minimum antara pesawat atau 1.000 ft sebagai jarak vertikal minimum. Kriteria ini disebut sebagai *protected zone* (PZ)

Tujuan dari permasalahan ini adalah menghindari pesawat dari konflik dan total perubahan yang tidak mengganggu *time*

flight. Solusi yang diberikan untuk permasalahan ini dengan menggunakan manuver kecepatan dan ketinggian. Model yang menggunakan solusi tersebut adalah model *velocity and altitude change* (VAC) yang diusulkan oleh Alonso et al [1] dengan menggunakan konstruksi geometri dan model *velocity change* (VC) yang diperkenalkan oleh Pallotino et al [2]. VAC bertujuan untuk mencari kecepatan dan ketinggian yang optimal agar pesawat terhindar dari kriteria konflik. Tujuan ini juga meminimalkan segala perubahan agar tidak mengubah *time flight*.

VC yang dijelaskan oleh Pallotino et al [2] adalah modifikasi dari ide perubahan kecepatan yang dijelaskan oleh Frizzoli et al [3]. Frizzoli et al [3] menjelaskan batasan variasi kecepatan yang tidak mengganggu konfigurasi kecepatan pesawat. Variasi kecepatan ini yang akan ditambahkan dengan kecepatan awal sehingga membentuk kecepatan yang optimal.

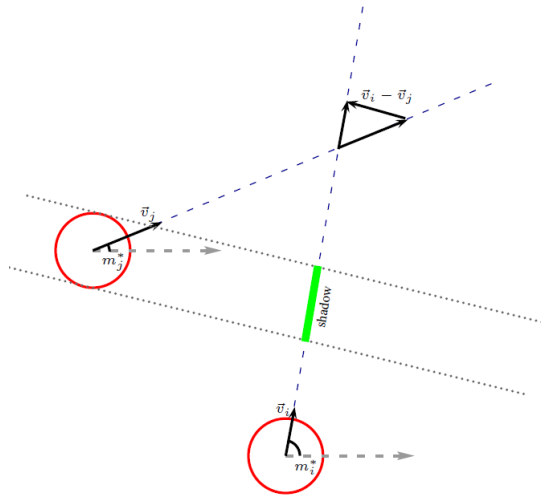
Alonso et al [1] memodifikasi model VC yang dilakukan oleh Pallotino et al [2] dengan penambahan kriteria konflik yaitu kasus anomali dan *false conflict* serta memberikan alternatif solusi menggunakan manuver ketinggian. Resolusi ketinggian yang diusulkan oleh Alonso et al [1] dengan cara mengelompokkan pesawat kedalam beberapa level ketinggian dimana jarak antar level adalah 1.000 ft. Penyelesaian model VAC menggunakan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP).

False conflict adalah parameter yang mendeteksi jika dua pesawat terbang saling menjauhi satu sama lain dan kasus anomali adalah mendeteksi pembagi bernilai 0 pada konstruksi geometri. Pada model *altitude change* (AC) yang diusulkan oleh Alonso et al [1] dilakukan pendeteksian dua pesawat terbang menuju satu sama lain, hal ini disebut dengan deteksi situasi *head to head* dan pendeteksian pasangan pesawat memiliki jarak kurang dari *safety distance* atau disebut dengan deteksi *similar coordinates*. Pendeteksian *false conflict*, kasus anomali, *head to head*, dan *similar coordinates* bertujuan untuk menyederhanakan model VAC.

II. VELOCITY CHANGE

A. Batasan Variasi Kecepatan

Nilai dari variasi kecepatan q untuk setiap pesawat f harus berada diantara kecepatan minimum v_f dan kecepatan



Gambar. 1. Situasi kedua pesawat tidak terjadi konflikt. Ditunjukkan dengan shadow yang tidak menyinggung safety distance salah satu pesawat.

maximum $\bar{v}_f$ dari setiap pesawat oleh karena itu formula batasan variasi kecepatan adalah

$$\underline{v}_f \leq v_f + q_f \leq \bar{v}_f \quad (1)$$

fungsi obyektif q memiliki nilai non-negatif yaitu q_f^+ dan q_f^- . Formula untuk mendapatkan nilai non-negatif adalah

$$q_f = q_f^+ + q_f^- \quad (2)$$

q_f^+ mengambil nilai positif q dan q_f^- mengambil nilai negatif q .

B. Konstruksi Geometri

Setiap pesawat f memiliki koordinat (x,y) , sudut (m^*) dengan batas $(-\pi, \pi]$, kecepatan (v) , dan radius (r) . Deteksi konflik kecepatan pesawat dapat dideteksi dengan melihat area tan difference vector kedua pesawat atau disebut dengan *shadow*. Konflik tidak terjadi jika *shadow* tidak menyinggung *safety distance* salah satu pesawat. Situasi tidak terjadi konflik dapat dilihat pada Gambar 1. Formula situasi tidak terjadi konflik adalah

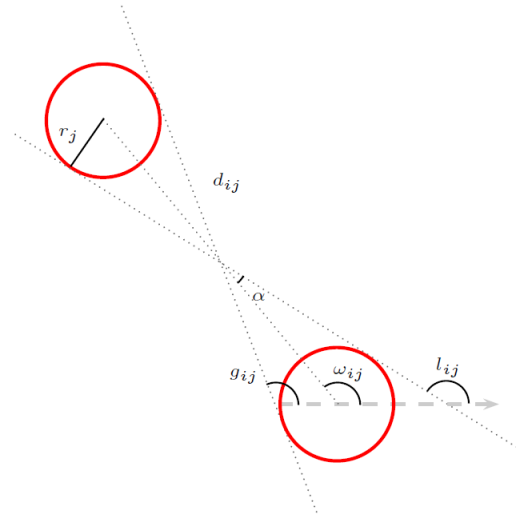
$$\frac{(v_i + q_i)\sin(m_i^*) - (v_j + q_j)\sin(m_j^*)}{(v_i + q_i)\cos(m_i^*) - (v_j + q_j)\cos(m_j^*)} \geq \tan(l_{ij}) \quad (3a)$$

atau

$$\frac{(v_i + q_i)\sin(m_i^*) - (v_j + q_j)\sin(m_j^*)}{(v_i + q_i)\cos(m_i^*) - (v_j + q_j)\cos(m_j^*)} \leq \tan(g_{ij}) \quad (3b)$$

Sudut l adalah batas luar safety distance dengan rumus $l_{ij} = \omega_{ij} + \alpha_{ij}$ dan sudut g adalah batas dalam safety distance dengan rumus $g_{ij} = \omega_{ij} - \alpha_{ij}$. α sebagai sudut antara *safety distance* dan jarak pesawat dengan rumus $\arctan(r_i + r_j/d_{ij})$. d_{ij} adalah jarak antara pesawat i dan pesawat j . ω adalah sudut yang menghubungkan kedua pesawat dengan rumus $\arcsin(y_i - y_j/x_i - x_j)$. Jika $y_i = y_j$ maka $\omega_{ij} = 0$ dan jika $x_i = x_j$

maka $\omega_{ij} = \pi/2$. Konstruksi geometri batas safety distance dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar. 2. Konstruksi geometri batas safety distance. Konstruksi ini sebagai penentu situasi tidak terjadinya konflik

Dari formula (3) memiliki kondisi yaitu ketika pembagi bernilai lebih besar dari 0, lebih kecil dari 0, dan sama dengan 0 atau disebut dengan kasus anomali.

Kasus: $(v_i + q_i)\cos(m_i^*) - (v_j + q_j)\cos(m_j^*) \leq 0$

$$\begin{aligned} (v_i + q_i)\cos(m_i^*) - (v_j + q_j)\cos(m_j^*) &\leq 0 \\ -(v_i + q_i)h_i + (v_j + q_j)h_j &\leq 0 \end{aligned} \quad (4a)$$

atau

$$\begin{aligned} (v_i + q_i)\cos(m_i^*) - (v_j + q_j)\cos(m_j^*) &\leq 0 \\ (v_i + q_i)k_i - (v_j + q_j)k_j &\leq 0 \end{aligned} \quad (4b)$$

Kasus: $(v_i + q_i)\cos(m_i^*) - (v_j + q_j)\cos(m_j^*) \geq 0$

$$\begin{aligned} -(v_i + q_i)\cos(m_i^*) + (v_j + q_j)\cos(m_j^*) &\leq 0 \\ (v_i + q_i)k_i - (v_j + q_j)k_j &\leq 0 \end{aligned} \quad (4c)$$

atau

$$\begin{aligned} -(v_i + q_i)\cos(m_i^*) + (v_j + q_j)\cos(m_j^*) &\leq 0 \\ -(v_i + q_i)k_i + (v_j + q_j)k_j &\leq 0 \end{aligned} \quad (4d)$$

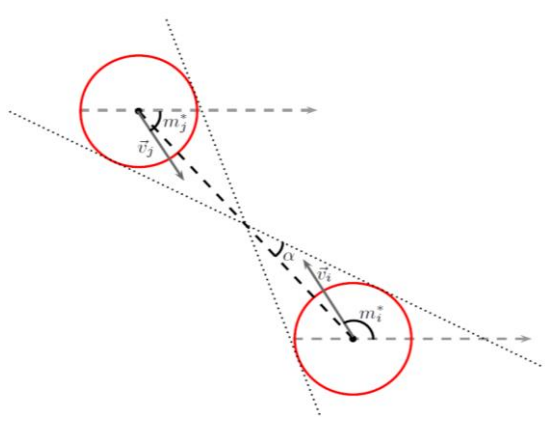
dengan parameter

$$h_i = \tan(l_{ij})\cos(m_i^*) - \sin(m_i^*) \quad (5a)$$

$$h_j = \tan(l_{ij})\cos(m_j^*) - \sin(m_j^*) \quad (5b)$$

$$k_i = \tan(g_{ij})\cos(m_i^*) - \sin(m_i^*) \quad (5c)$$

$$k_j = \tan(g_{ij})\cos(m_j^*) - \sin(m_j^*) \quad (5d)$$



Gambar. 3. Situasi kedua pesawat saling menuju satu sama lain atau situasi head to head.

C. Kasus Anomali

Kasus anomali diselesaikan dengan menambahkan $\pi/2$ radian pada arah sudut m^* , sudut l , dan sudut g . Mendeteksi pasangan pesawat yang memiliki kasus anomali atau *pathological case* (*pc*) dapat dilakukan pada praproses yaitu

$$pc_{ij} = 1, \text{ if } : |x_i - x_j| \leq r_i + r_j \quad (6)$$

D. False Conflict

False conflict adalah keadaan dimana dua pesawat terbang menjauhi titik potongnya. Keadaan ini seharusnya tidak terjadi konflik tetapi konstruksi geometri (3) menganggap kedua pesawat ini dalam keadaan konflik. Untuk mendeteksi apakah kedua pesawat termasuk dalam *false conflict* (*fc*) dapat dilakukan pada praproses dengan cara menghitung jarak pesawat ke titik potong dan jarak sudut ke titik potong. Formulanya adalah sebagai berikut

$$fc_{ij} = 1, \text{ if } : d_{ij}^2 - d_{ij}^1 > 0 \wedge d_{ji}^2 - d_{ji}^1 > 0 \wedge sc_{ij}, hth_{ij} \neq 1 \quad (7)$$

dengan

$$d_{ij}^1 = \text{jarak}\{(x_i, y_i), ip_{ij}\} \quad (8a)$$

$$d_{ji}^1 = \text{jarak}\{(x_j, y_j), ip_{ij}\} \quad (8b)$$

$$d_{ij}^2 = \text{jarak}\{(x_i + \cos(m_i^*), y_i + \sin(m_i^*)), ip_{ij}\} \quad (8c)$$

$$d_{ji}^2 = \text{jarak}\{(x_j + \cos(m_j^*), y_j + \sin(m_j^*)), ip_{ij}\} \quad (8d)$$

ip_{ij} adalah parameter titik potong yang terdiri dari Xip_{ij} sebagai koordinat x dari titik potong dan Yip_{ij} sebagai koordinat y dari titik potong. Untuk menghitung titik potong dapat menggunakan *velocity vector* $\vec{v}_f = (v_f^1, v_f^2)$ dan koordinat (x_f, y_f) dari setiap pesawat. Titik potongnya (Xip_{ij} , Yip_{ij}) adalah

$$\left(\frac{y_j - \frac{v_j^2}{v_j^1} x_j - y_i - \frac{v_i^2}{v_i^1} x_i}{\frac{v_i^2}{v_i^1} - \frac{v_j^2}{v_j^1}}, \frac{\frac{v_i^2}{v_i^1} (y_j - \frac{v_j^2}{v_j^1} x_j) - \frac{v_j^2}{v_j^1} (y_i - \frac{v_i^2}{v_i^1} x_i)}{\frac{v_i^2}{v_i^1} - \frac{v_j^2}{v_j^1}} \right) \quad (8e)$$

sc_{ij} adalah parameter yang mendeteksi jika ada dua pesawat yang memiliki jarak kurang dari *safety distance* dan hth_{ij} adalah parameter yang mendeteksi pasangan pesawat yang terbang menuju satu sama lain. Penggunaan fc_{ij} sebagai batasan atau kriteria untuk model VC sehingga yang dihitung pada model VC adalah $fc_{ij} = 0$.

III. ALTITUDE CHANGE

A. Batasan Ketinggian

Setiap pesawat harus berada di salah satu level ketinggian. Formula untuk batasan ini adalah pesawat harus berada di salah satu level ketinggian yang ada oleh karena itu formula batasan ketinggian adalah

$$\sum_{z \in Z^f} v_f^z = 1 \quad (9)$$

v_f^z adalah binary variabel yang bernilai bernilai 1 jika pesawat f terbang pada level ketinggian z dan 0 untuk sebaliknya.

B. Head to Head

hth_{ij} adalah parameter yang mendeteksi pasangan pesawat yang terbang menuju satu sama lain. hth_{ij} dilakukan pada praproses. Pada pesawat yang terbang menuju satu sama lain tidak bisa diselesaikan dengan solusi perubahan kecepatan dikarenakan kedua pesawat akan saling menabarak satu sama lain. Oleh karena solusi yang diberikan adalah dengan mengubah ketinggian salah satu pesawat. Untuk mendeteksi pesawat terbang menuju satu sama lain dengan menggunakan modifikasi sudut ω .

$\hat{\omega}_{ij}$ adalah ω_{ij} dengan tambahan kriteria dari letak quadran pesawat j dilihat dari pesawat i . Jika pesawat j berada di quadran I dan IV maka $\hat{\omega}_{ij} = \omega_{ij}$, jika berada di quadran II maka $\hat{\omega}_{ij} = \omega_{ij} + \pi$ dan untuk pesawat j yang berada di quadran III $\hat{\omega}_{ij} = \omega_{ij} - \pi$. Sudut $\hat{\omega}_{ij}$ harus berada diantara $(-\pi, \pi]$. Dengan formula hth_{ij} adalah

$$hth_{ij} = 1, \text{ if } : \hat{g}_{ij} \leq m_i^* \leq \hat{l}_{ij} \wedge \hat{g}_{ji} \leq m_j^* \leq \hat{l}_{ji} \quad (10)$$

Dengan sudut $\hat{l}_{ij} = \hat{\omega}_{ij} + \alpha_{ij}$ dan $\hat{g}_{ij} = \hat{\omega}_{ij} - \alpha_{ij}$.

C. Similar Coordinates

sc_{ij} adalah parameter yang mendeteksi jika ada dua pesawat yang memiliki jarak kurang dari *safety distance*. Permasalahan ini diselesaikan dengan model AC. Perhitungan sc_{ij} dilakukan pada saat praproses. Formula sc_{ij} adalah

$$sc_{ij} = 1, \text{ if } : d_{ij} \leq r_i + r_j \quad (11)$$

D. Batasan Perbedaan Ketinggian

Hasil praproses untuk parameter hth_{ij} dan sc_{ij} akan disimpan divariabel keputusan δ_{ijx}^5 . δ_{ijx}^5 adalah variabel keputusan yang berperan sebagai penanda bahwa pasangan tersebut termasuk dalam model AC dan kedua pesawat harus memiliki level

ketinggian yang berbeda, sehingga batasan tersebut di formulakan menjadi

$$\delta_{ijz}^5 = 1, \text{ if } : h_{th_{ij}} + sc_{ij} \geq 1 \quad (12)$$

Jika salah satu pasangan pesawat termasuk dalam kriteria *head to head* atau *similar coordinates* maka δ_{ijz}^5 akan bernilai 1. Untuk pasangan yang memiliki δ_{ijz}^5 bernilai 1 akan harus terbang pada level yang berbeda, dinyatakan oleh formula

$$v_i^z + v_j^z \geq \delta_{ijz}^5 - 1 \quad (13a)$$

$$v_i^z + v_j^z \leq 2 - \delta_{ijz}^5 \quad (13b)$$

E. Batasan Perubahan Level

Perubahan ketinggian level tidak dibatasi. Pesawat bisa untuk turun ataupun naik level melebihi dari 1 level. Untuk melihat berapa nilai perubahan level dapat dinyatakan seperti berikut

$$\sum_{z \in Z^f} zv_f^z - z_f \leq \rho_f \quad (14a)$$

$$z_f - \sum_{z \in Z^f} zv_f^z \leq \rho_f \quad (14b)$$

Nilai ρ_f bersifat non-negatif integer.

$$\sum_{z \in Z^f} zv_f^z = z'_f \quad (15)$$

variabel z'_f digunakan untuk melihat level ketinggian untuk setiap pesawat setelah optimasi.

IV. MODEL VELOCITY AND ALTITUDE CHANGE

A. Fungsi Obyektif

Fungsi obyektif model VAC adalah meminimalkan variasi kecepatan q agar seminimal mungkin pesawat tidak terlambat ataupun terlebih dahulu sampai pada tujuan dan meminimalkan perubahan level atau ketinggian ρ agar seminimal mungkin pesawat yang mengubah ketinggian atau level.

$$\min w_1 \sum_{f \in F} \left(\frac{c_f^{q+} q_f^+}{\bar{v}_f - v_f} + \frac{c_f^{q-} q_f^-}{\bar{v}_f - v_f} \right) + w_2 \sum_{f \in F} c_f^j \rho_f \quad (16)$$

variabel w_n adalah beban yang di pertimbangkan untuk setiap fungsi obyektif. Nilai w_1 dan w_2 diset 0.5. c_f^{q+}, c_f^{q-} adalah cost untuk positif dan negatif variasi perubahan kecepatan untuk setiap pesawat dan diset 1. c_f^j adalah cost untuk jumlah perubahan level ketinggian pada setiap pesawat dan diset 1.

B. Batasan Modifikasi Konstruksi Geometri Velocity Change

Batasan (4) harus diubah menjadi linear dengan penambahan kasus anomali dan kriteria *false conflict*. Modifikasi batasan (4) menjadi

$$\forall i, j \in F \mid i < j, \forall z \in Z^i \cap Z^j \wedge fc_{ij} = 0$$

$$\begin{aligned} & (v_i + q_i)(\cos(m_i^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_i^*)pc_{ij}) \\ & - (v_j + q_j)(\cos(m_j^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_j^*)pc_{ij}) \\ & \leq (\bar{v}_i + \bar{v}_j)(1 - \delta_{ijz}^1) \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} & - (v_i + q_i)(h_i(1 - pc_{ij}) + h_i'pc_{ij}) + (v_j + q_j) \\ & (h_j(1 - pc_{ij}) + h_j'pc_{ij}) \leq ((\bar{v}_i \mid h_i \mid + \bar{v}_j \mid h_j \mid) \\ & (1 - pc_{ij}) + (\bar{v}_i \mid h_i' \mid + \bar{v}_j \mid h_j' \mid)pc_{ij})(1 - \delta_{ijz}^1) \end{aligned} \quad (17b)$$

$$\begin{aligned} & (v_i + q_i)(\cos(m_i^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_i^*)pc_{ij}) \\ & - (v_j + q_j)(\cos(m_j^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_j^*)pc_{ij}) \\ & \leq (\bar{v}_i + \bar{v}_j)(1 - \delta_{ijz}^2) \end{aligned} \quad (17c)$$

$$\begin{aligned} & (v_i + q_i)(k_i(1 - pc_{ij}) + k_i'pc_{ij}) - (v_j + q_j) \\ & (k_j(1 - pc_{ij}) + k_j'pc_{ij}) \leq ((\bar{v}_i \mid k_i \mid + \bar{v}_j \mid k_j \mid) \\ & (1 - pc_{ij}) + (\bar{v}_i \mid k_i' \mid + \bar{v}_j \mid k_j' \mid)pc_{ij})(1 - \delta_{ijz}^1) \end{aligned} \quad (17d)$$

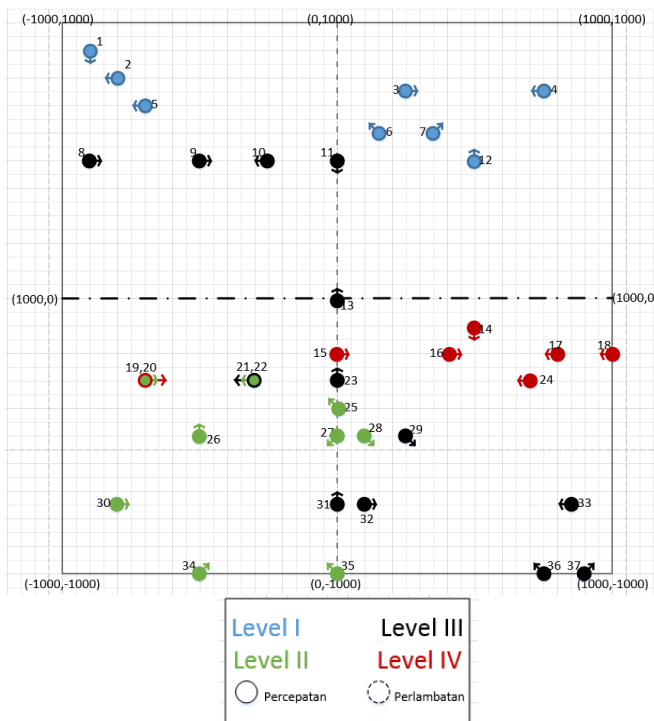
$$\begin{aligned} & - (v_i + q_i)(\cos(m_i^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_i^*)pc_{ij}) \\ & + (v_j + q_j)(\cos(m_j^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_j^*)pc_{ij}) \\ & \leq (\bar{v}_i + \bar{v}_j)(1 - \delta_{ijz}^3) \end{aligned} \quad (17e)$$

$$\begin{aligned} & (v_i + q_i)(h_i(1 - pc_{ij}) + h_i'pc_{ij}) - (v_j + q_j) \\ & (h_j(1 - pc_{ij}) + h_j'pc_{ij}) \leq ((\bar{v}_i \mid h_i \mid + \bar{v}_j \mid h_j \mid) \\ & (1 - pc_{ij}) + (\bar{v}_i \mid h_i' \mid + \bar{v}_j \mid h_j' \mid)pc_{ij})(1 - \delta_{ijz}^1) \end{aligned} \quad (17f)$$

$$\begin{aligned} & - (v_i + q_i)(\cos(m_i^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_i^*)pc_{ij}) \\ & + (v_j + q_j)(\cos(m_j^*)(1 - pc_{ij}) - \sin(m_j^*)pc_{ij}) \\ & \leq (\bar{v}_i + \bar{v}_j)(1 - \delta_{ijz}^4) \end{aligned} \quad (17g)$$

$$\begin{aligned} & - (v_i + q_i)(k_i(1 - pc_{ij}) + k_i'pc_{ij}) + (v_j + q_j) \\ & (k_j(1 - pc_{ij}) + k_j'pc_{ij}) \leq ((\bar{v}_i \mid k_i \mid + \bar{v}_j \mid k_j \mid) \\ & (1 - pc_{ij}) + (\bar{v}_i \mid k_i' \mid + \bar{v}_j \mid k_j' \mid)pc_{ij})(1 - \delta_{ijz}^1) \end{aligned} \quad (17h)$$

$$\delta_{ijz}^1 + \delta_{ijz}^2 + \delta_{ijz}^3 + \delta_{ijz}^4 + \delta_{ijz}^5 = 1 \quad (17i)$$



Gambar 4. Visualisasi data uji coba 37 pesawat

dengan parameter

$$h'_i = \tan(l_{ij} + \frac{\pi}{2}) \sin(m_i^*) - \cos(m_i^*) \quad (18a)$$

$$h'_j = \tan(l_{ij} + \frac{\pi}{2}) \sin(m_j^*) - \cos(m_j^*) \quad (18b)$$

$$k'_i = \tan(g_{ij} + \frac{\pi}{2}) \sin(m_i^*) - \cos(m_i^*) \quad (18c)$$

$$k'_j = \tan(g_{ij} + \frac{\pi}{2}) \sin(m_j^*) - \cos(m_j^*) \quad (18d)$$

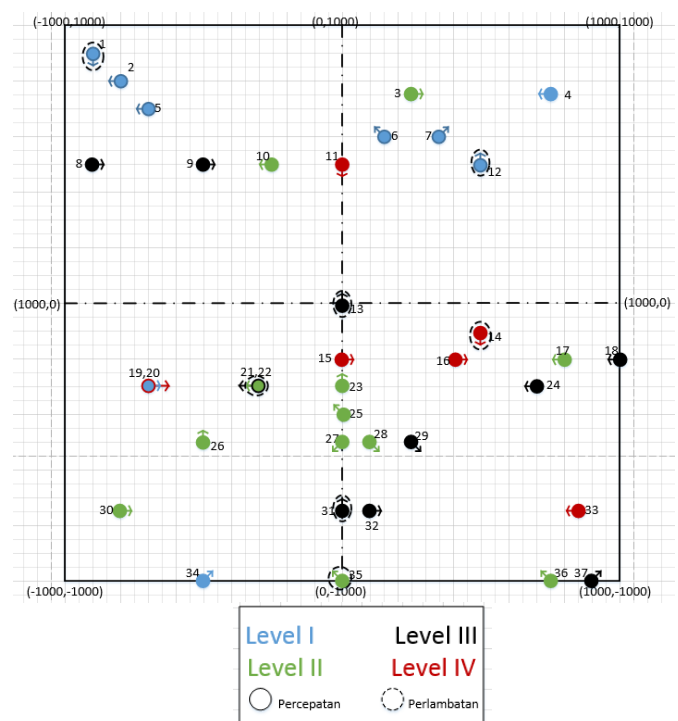
V. STUDI KASUS

Uji coba model VAC menggunakan data sesuai Gambar 4 dengan studi kasus $F = 37$ pesawat, $Z = 4$ level, dan safety radius setiap pesawat $r_f = 2.5$ nm. Kecepatan pesawat sama yaitu 9, kecepatan maksimal 10, dan kecepatan minimal adalah 8, kecuali kecepatan pada pesawat ke-18 dan 23 adalah 100, kecepatan maksimal 101, dan kecepatan minimal 99.

Hasil uji coba dapat dilihat pada Gambar 5 dengan hasil:

- 1) Nilai obyektif 6.5562054543 atau dibulatkan menjadi 6.5562.
- 2) Jumlah *constraint* 29130.
- 3) Jumlah variabel *binary* 27602.
- 4) 37 variabel *continue*.
- 5) Hasil kinerja *cpu time* 21 menit 19,15 detik dan *real time* 21 menit 46,08 detik.

Praproses proses dilakukan mulai dari konstruksi geometri (5), kasus anomali (6) (18), *similar coordinates* (11), situasi *head to head* (10), dan *false conflict* (7) (8). Hasil praproses dan data input digunakan pada model VAC dengan batasan (1),



Gambar 5. Visualisasi hasil optimasi pada uji coba 37 pesawat

(2), (9), (12) sampai (15), dan (17) dengan fungsi obyektif (16).

VI. KESIMPULAN/RINGKASAN

Model VAC mampu menyelesaikan permasalahan penghindaran konflik karena menggunakan konstruksi geometri untuk mengatasi berbagai situasi konflik yang meliputi situasi *head to head*, *similar coordinates*, kasus anomali, *false conflict*. Implementasi model VAC menggunakan kaskas bantu SAS 9.2 dengan meliputi modul praproses dan modul optimasi dengan *solver Mixed Integer Linear Programming*. Hasil uji kinerja 37 pesawat menunjukkan nilai obyektif 6.5562 dengan jumlah *constraint* sebanyak 29130, 27602 variabel *binary*, dan 37 variabel *continue* dengan waktu *cpu time* 21 menit 19,15 detik dan *real time* 21 menit 46,08 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis I.F. mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa, Orang Tua, Bapak Rully Soelaiman sebagai pembimbing kedua, Bapak Victor Hariadi sebagai pembimbing pertama, Bapak Ibu Dosen Teknik Informatika ITS, Staff Teknik Informatika ITS serta Teman-Teman Teknik Informatika ITS yang mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Francisco Javier Martín-Campo, "The Collision Avoidance Problem: Methods and Algorithms," Ph.D. dissertation, Department of Statistics and Operation Research, Univ. Rey Juan Carlos, Madrid (2010, Jul.).
- [2] L. Pallottino, E. Feron, and A. Bicchi, "Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer

- programming," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 3–11 (2002, Mar.).
- [3] E. Frazzoli, Z.-H. Mao, J.-H. Oh, and E. Feron, "Resolution of conflicts involving many aircraft via semidefinite programming," *AIAA J. Guid., Control Dyn.*, vol. 24, no. 1, pp. 79–86 (Jan./Feb. 1999).
- [4] J. Krozel and M. Peters, "Strategic conflict detection and resolution for free flight," in *Proc. 36th Conf. Decision Control*, (Dec. 1997) pp. 1822–1828.
- [5] A. Alonso-Ayuso, L. F. Escudero, F. J. Martín-Campo, "Collision avoidance in the air traffic management: a mixed integer linear optimization approach," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 47–57 (Mar. 2011).