

Supervisoy Control Pada Sistem Pengaturan Lalu Lintas Bandara Internasional Juanda Pada Arah Runway 10 Dengan Menggunakan Petri Net

Petrus Fendiyanto

Universitas Mulawarman, Jl. Kuaro, Gn. Kelua 75119, Samarinda
petrus@fkip.unmul.ac.id

Abstrak

Bandara Juanda merupakan salah satu bandara tersibuk di Indonesia, yang tiap tahun jumlah penumpangnya mengalami peningkatan. Begitu juga dari sisi pergerakan pesawat juga mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Yang dimaksud pergerakan pesawat adalah total pesawat yang *take off* dan *landing* di *runway*. Dengan padatnya arus lalu lintas di Bandara Juanda, maka perlu adanya pengaturan secara intensif dari seorang *air traffic controller* (ATC) sehingga insiden atau tabrakan antar pesawat antar pesawat dapat dihindari dan terciptanya kelancaran serta keteraturan lalu lintas di bandara. Penelitian ini dimaksudkan bagaimana mengatur sistem pengaturan lalu lintas di bandara pada pergerakan pesawat di *runway*. Jika sistem dimodelkan dengan petri net maka hasil dari model itu disebut model petri net. Ada kemungkinan bahwa sistem dapat melanggar pembatas atau kendala yang diberikan, sehingga perlu dikontrol oleh agen eksternal yang disebut *supervisor*. Sistem pengaturan pergerakan pesawat terbang di Bandara Internasional Juanda dapat dimodelkan menggunakan petri net dengan 187 *places* dan 157 transisi pada arah *runway* 10. Pesawat terbang tersebut dimisalkan oleh sebuah token atau dot. Sedangkan *places* menunjukkan tempat atau daerah yang dilalui pesawat dan transisi menunjukkan pergerakan pesawat saat *landing* atau *take off*. Sistem pengaturan pergerakan pesawat terbang di bandara yang dimodelkan petri net ini dapat mencegah terjadinya insiden atau tabrakan antar pesawat, yang ditunjukkan dengan setiap *place* berisi satu token, yang dalam hal ini *place controller* bertindak sebagai *supervisor* dengan tujuan mencegah token untuk memasuki *place* yang sama.

Kata Kunci: Petri Net; Sistem Pengaturan Lalu Lintas Bandara; *Supervisory Control*

Abstract

Juanda Airport is one of the busiest airports in Indonesia, where the number of passengers increases every year. Likewise, aircraft movements have also increased from year to year. What is meant by aircraft movement is the total number of aircraft that land and take off on the runway. With the dense traffic flow at Juanda Airport, it is necessary to have intensive arrangements from an air traffic controller (ATC) so that incidents or collisions between planes can be avoided and traffic can be smooth and orderly at the airport. This research is intended to regulate the traffic control system at the airport regarding the movement of aircraft on the runway. If the system is modeled with a petri net then the results of that model are called a Petri net model. There is a possibility that the system can violate the given constraints or constraints, so it needs to be controlled by an external agent called a supervisor. The aircraft movement management system at Juanda International Airport can be modeled using a Petri net with 187 places and 157 transitions in the direction of runway 10. The aircraft is represented by a token or dot. Meanwhile, places show the place or area the plane is passing through and transition shows the movement of the plane when landing or taking off. This petri net-modeled aircraft movement control system at the

airport can prevent incidents or collisions between aircraft, which is indicated by each place containing one token, in this case, the place controller acts as a supervisor to prevent tokens from entering the same place.

Keywords: *Petri Net; Airport Traffic Management System; Supervisory Control*

Pendahuluan

Surabaya merupakan ibu kota Provinsi Jawa Timur juga sebagai kota kedua di Indonesia, memiliki kemiripan dengan Jakarta sebagai pusat perekonomian di Indonesia. Surabaya menjadi kota tujuan oleh para pebisnis. Salah satu hal yang berkaitan erat dengan ini adalah transportasi sebagai dukungan menjalankan aktivitas tersebut. Tingginya permintaan layanan transportasi udara menunjukkan padatnya aktivitas di kota ini. Hal ini secara khusus ditandai juga dengan banyaknya pergerakan pesawat di Bandara Internasional Juanda (Prasetya et al., 2023).

Berdasarkan harian *ekonomi.bisnis.com* (ekonomi.bisnis.com, 2023) menyebutkan bahwa rute penerbangan Jakarta-Surabaya merupakan salah satu rute terpadat penerbangan pesawat di Indonesia. Seiring dengan pertumbuhan ekonomi, rute penerbangan ini akan terus meningkat. Selain itu harian *antaranews.com* (antaranews.com, 2024), menyebutkan bahwa jumlah penumpang pesawat terbang di Bandara Internasional Juanda pada tahun 2023 sebanyak 14.012.186 atau meningkat 30 persen dibandingkan pada tahun 2022. Kenaikan jumlah penumpang sejalan dengan kenaikan jumlah pergerakan pesawat di Bandara Internasional Juanda, yaitu sebesar 24 persen atau 78.028 pergerakan pesawat di tahun 2022. Dan menjadi 96.931 pergerakan pesawat di tahun 2023. Yang dimaksud dengan pergerakan pesawat adalah total pesawat yang *take off* dan landing di *runway* (Panguriseng, 2010).

Dengan padatnya arus lalu lintas di Bandara Internasional Juanda maka perlu adanya pengaturan secara intensif dari seorang *air traffic controller* (ATC) sehingga insiden atau tabrakan antar pesawat dapat dihindari dan terciptanya kelancaran serta keteraturan lalu lintas di bandara. Menurut Operation Junior Manager Perum LPPNPI (Lembaga Penyelenggara Pelayanan Navigasi Penerbangan Indonesia), kapasitas maksimal runway Bandara Juanda adalah 28 pergerakan pesawat *take off* atau *landing* per jam. Namun yang terjadi belakangan dapat mencapai 34 pergerakan pesawat per jam (*Annual Report 2015*, 2015). Jika dilihat dari spesifikasi bandara, Bandara Internasional Juanda memang hanya memiliki satu buah runway yang digunakan untuk *landing* maupun *take off*. Sebagai pembandingnya, Bandara Internasional Soekarno-Hatta memiliki jumlah *runway* lebih banyak yaitu sebanyak dua buah. Mengingat

jumlah pergerakan pesawat yang terjadi di Bandara Juanda memiliki kepadatan yang tinggi selayaknya Bandara Soekarno-Hatta, tentunya ini menjadi hal yang perlu diperhatikan lebih (Fendiyanto, 2019).

Penelitian ini dimaksudkan bagaimana mengatur sistem pengaturan lalu dibandara. Sistem pengaturan pergerakan pesawat terbang di bandara yang dimodelkan dengan petri net dapat mencegah terjadinya insiden atau tabrakan antar pesawat, yang ditunjukkan dengan setiap *place* berisi satu token, yang dalam hal ini *place controller* bertindak sebagai supervisor dengan tujuan mencegah token untuk memasuki *place* yang sama. Ada penelitian yang terkait dengan pemodelan pada sistem event diskrit yaitu implementasi aljabar max-plus pada pemodelan dan penjadwalan keberangkatan bus kota damri (Oktavianto, 2013). Dan penelitian terkait dengan penjadwalan pesawat terbang yang transit di Bandara Internasional Soekarno-Hatta Jakarta dengan menggunakan sistem linear max-plus dilakukan oleh Nevan (2021). Serta penelitian terkait dengan penjadwalan pesawat dilakukan oleh dyah Arum Anggraeni (2013) dengan judul analisis jadwal keberangkatan pesawat transit di bandara dengan menggunakan aljabar max-plus. Penelitian mengenai pemodelan sistem event diskrit diatas hanya membahas penjadwalan yang dimodelkan dengan aljabar max-plus dan sistem linear max-plus, sedangkan penelitian terkait masalah pengaturan pergerakan pesawat dengan memanfaatkan petri net sebagai alat pemodelannya belum dilakukan.

Kontrol yang dibatasi waktu pada sistem event diskrit telah menjadi bidang penelitian yang aktif sejak pertengahan 1980 yang dilakukan oleh Ramadge dan Wonham (Ramadge & Wonham, 1989). Dalam sistem *event* diskrit, sistem yang dikontrol disebut dengan *plant*. Jika sistem dimodelkan dengan petri net, maka hasil dari model petri net itu disebut dengan model *plant* (petri net). Ada kemungkinan bahwa *plant* dapat melanggar pembatas atau kendala yang diberikan pada sistem, sehingga perlu untuk dikontrol oleh agen eksternal yang disebut dengan *supervisor*. Tujuan dari *supervisor* adalah untuk membatasi sehingga *event* yang tidak diinginkan tidak dapat terjadi. Selain itu, untuk menjaga dari suatu *event* yang mungkin. Dalam hal ini, *controller* hanya bertindak jika terjadi hal-hal yang salah atau mengancam pada sistem (Giua & Seatzu, 2015).

Metode Penelitian

Petri net adalah graph bipartit berarah dengan strukturnya terdiri dari

$$(P, T, D^+, D^-) \dots\dots\dots (1)$$

dengan P dan T mewakili simpul dari grafik yang disebut dengan places dan transisi. Sedangkan D^+ dan D^- merupakan matriks bilangan bulat dengan elemen tak negatif yang mewakili hubungan antar dua jenis simpul. Places berisi sel yang disebut dengan token, ketika transisi difire token akan bergerak dari *places* yang satu ke *places* yang lain. Arc dengan bobot D_{ij}^+ menghubungkan transisi j ke *places* i dan menunjukkan bahwa ketika transisi j difire, *place* i akan menerima bobot sebesar D_{ij}^+ . Sedangkan *arc* dengan bobot D_{kj}^- menghubungkan dari *places* k ke transisi j, menunjukkan bahwa *places* k minimal berisi D_{kj}^- token sebelum transisi dapat difire. Ketika transisi j difire *place* k akan kehilangan D_{kj}^- token. Transisi yang dapat difire adalah saat input *places* berisi jumlah minimal token. Kondisi ini disebut dengan *enabled* (dapat difire). Saat transisi difire, *places* input akan kehilangan sejumlah token dan *places* output akan mendapat sejumlah token. Penanda awal pada petri net disimbolkan dengan μ_0 dan transisi pada petri net difire secara diskrit. Transisi yang difire diwakilkan oleh bilangan bulat vektor q. Elemen q adalah 0 jika transisi tidak difire dan elemen dari q adalah 1 jika transisi difire. Kondisi *enabled* yang diberikan dalam pemfirean vektor q ditentukan oleh

$$\mu \geq D^-q \dots\dots\dots (2)$$

dengan μ merupakan token pada places dan D^-q merupakan bobot pada *arc* yang menghubungkan *places* ke transisi. Matriks *incidence* didefinisikan sebagai

$$D = D^+ - D^- \dots\dots\dots (3)$$

Tujuan *supervisory control* adalah membatasi penanda μ_p dari *plant* dengan

$$l^T \mu_p \leq b \dots\dots\dots (4)$$

dengan l adalah vektor bobot dan b adalah bilangan skalar (Moody & Antsaklis, 1998).

Tahapan penelitian yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan ini adalah (Utomo, 2015):

a. Survey pendahuluan

Penelitian ini diawali dengan survey pendahuluan ke lokasi penelitian, yaitu Bandara Internasional Juanda Surabaya. Tujuannya adalah untuk melihat proses pergerakan pesawat dalam melakukan proses *landing*, yaitu dari posisi pesawat di wilayah *approach* (siap landing) hingga menuju ke *apron* (terminal I dan terminal II). Dan proses take off yaitu dimulai dari pesawat di dorong oleh *pushback car* di apron (terminal I dan terminal II) hingga terbang meninggalkan bandara. Lokasi pengamatan di tower *Air Traffic Controller* (ATC).

b. Mengumpulkan dan mengolah data

Data sekunder diperoleh dari PT. Angkasa Pura I Cabang Surabaya, yaitu route atau alur pergerakan pesawat terbang di bandara yang diperoleh dari PT. Lembaga pelayanan Navigasi penerbangan Indonesia (LPNPI). Data yang diperoleh sebagai landasan membnetuk model petri net.

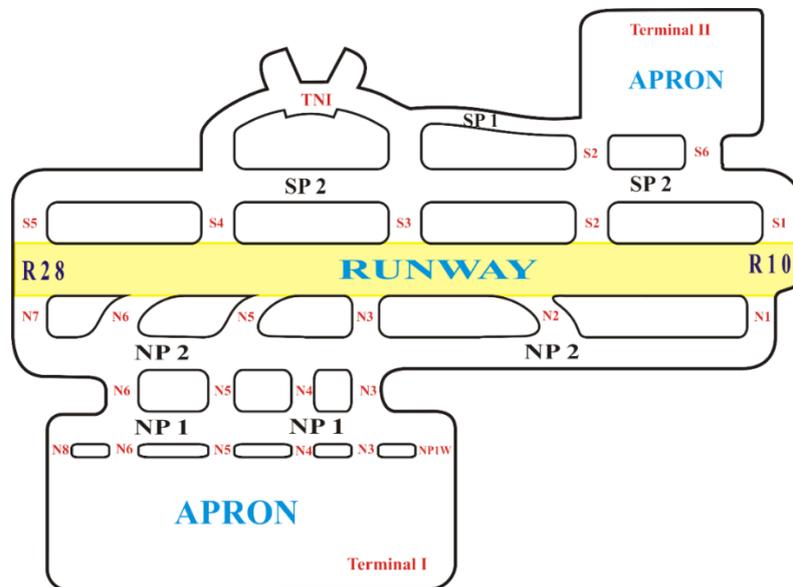
- c. Menyusun model petri net dari sistem pengaturan lalu lintas Bandara Internasional Juanda
Pada tahap ini dibuat model dari alur atau route pergerakan pesawat dari posisi pesawat di *approach* (siap untuk *landing*) hingga menuju ke *apron* (*parking stand*) dan pergerakan pesawat saat *take off* yang dimulai dari wilayah *apron* sampai pesawat meninggalkan bandara. Gambaran simulasi model petri net tersebut dibuat dengan menggunakan alat bantu PIPEv 4.30.

Hasil dan Pembahasan

a. Pergerakan pesawat melalui arah *runway* 10

Penelitian ini dilakukan di Bandara Internasional Juanda yang terletak sekitar 20 kilometer sebelah selatan kota Surabaya, Jawa Timur. Dalam sehari pergerakan pesawat di Bandara Juanda dapat mencapai 400 kali lebih dari 30 pesawat *take off* atau *landing* per jamnya (Rahayuningtyas, 2020). Bandara Internasional Juanda memiliki satu buah *runway* dengan panjang 3000 m yang digunakan untuk dua buah terminal, yaitu terminal I dan terminal II. Terminal I untuk penerbangan domestik, sedangkan terminal II diperuntukan untuk semua penerbangan internasional dan sebagaian domestik. Arah pergerakan pesawat di Bandara Juanda ada dua arah, yaitu melalui arah *runway* 10 dan *runway* 28. Pemilihan *runway* ini tergantung dengan arah pergerakan angin, cuaca, dan beberapa faktor lain yang mempengaruhi dalam proses penerbangan pesawat. Pada penelitian ini, model petri net yang dipilih yaitu pergerakan pesawat melalui arah *runway* 10. Sebelum menuju ke *runway* (saat pesawat bersiap untuk *take off*), pesawat didorong oleh *puschback car* untuk mendekati *exit taxiway* pesawat dan selanjutnya bergerak dari *apron* (tempat parkir pesawat) menuju ke *taxiway paralel* (sejajar dengan *runway*). Setelah sampai di *final taxiway take off*, pesawat menunggu clearance dari air traffic controller (ATC) untuk melakukan *take off*. Setelah mendapat izin dari *air traffic controller* (ATC), pesawat segera memasuki area *runway* dan melakukan *take off*. Sedangkan pesawat yang landing melalui arah *runway* 10 menuju ke *runway*, dikontrol oleh petugas *air traffic controller*. Selanjutnya petugas *ground controller* akan mengarahkan pilot untuk menggerakkan pesawat dari *runway* menuju *taxiway*. Tujuan dari pengarahan tersebut agar tidak terjadi *deadlock* antara pesawat yag bergerak secara bersamaan dari *apron* menuju ke *runway* (akan *take off*). Gambar

1 menunjukkan komponen yang dilalui pesawat saat melakukan *take off* atau *landing* di Bandara Internasional Juanda.



Gambar 1. Airport Traffic di Juanda Surabaya

Keterangan:

- | | | | |
|-----|------------------------|------|-----------------------------|
| R10 | : Runway 10 | R28 | : Runway 28 |
| N1 | : Nopember One | NP1W | : Nopember Paralel One West |
| N2 | : Nopember Two | N3 | : Nopember Three |
| N4 | : Nopember Four | N5 | : Nopember Five |
| N6 | : Nopember Six | N7 | : Nopember Seven |
| N8 | : Nopember Eight | | |
| S1 | : Siera One | S2 | : Siera Two |
| S3 | : Siera Three | S4 | : Siera Four |
| S5 | : Siera Five | S6 | : Siera Six |
| NP1 | : Nopember Paralel One | NP2 | : Nopember Paralel Two |
| SP1 | : Siera Paralel One | SP2 | : Siera Paralel Two |

Runway Bandara Internasional Juanda hanya dapat digunakan satu aktivitas pada satu waktu yaitu *landing* atau *take off*. Hal ini menyebabkan harus ada salah satu aktivitas yang mengantri yaitu pesawat yang akan *landing* atau *take off*, dan ada mekanisme yang mengatur kedua aktivitas tersebut. Secara umum *route* pergerakan pesawat ketika *landing* melalui arah runway 10 di terminal I dan terminal II dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Route pergerakan pesawat *landing* di runway 10

Terminal	Exit	Stax	Route
Terminal I	N6, N7	A1	N6-N8-Apron
		A2	N6-Apron
	N5	B	N5-Apron
		N3	C1
	C2		N3-Apron
Terminal II	S3, S4, S5	G	SP2-S2-Apron

Sedangkan *route* pergerakan pesawat ketika akan *take off* dapat dilihat pada Tabel 2.

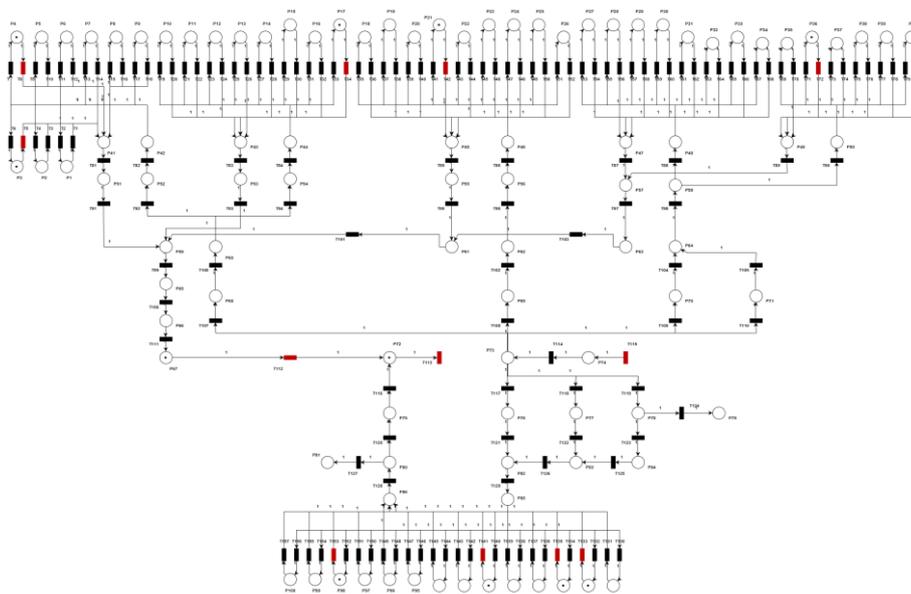
Tabel 2. *Route* pergerakan pesawat *take off* di *runway* 10

Terminal	Stax	Route
Terminal I	D1	N8-N6-NP2-N1
	D2	N6-NP2-N1
	D3	N5-NP2-N1
	D4	N4-NP2-N1
	D5	N3-NP2-N1
Terminal II	H	S6-SP2-S1

Jika pesawat dengan kondisi khusus (ancaman bom atau pembajakan) akan dilokasikan di area terisolasi yang telah tersedia yaitu di *east alarm area* atau *west alarm area*. Selanjutnya dari proses perserakan pesawat saat melakukan *landing* atau *take off* melalui arah *runway* 10 yang akan disimulasikan pada model petri net dengan menggunakan alat bantuan PIPEv 4.30.

b. Model petri net *airport traffic control* pada arah *runway* 10

Pergerakan pesawat melalui arah *runway* 10 ini dimodelkan menggunakan Petri net dengan 100 *places* dan 157 transisi. Pesawat tersebut di misalkan oleh sebuah token atau dot pada model petri net. P merupakan himpunan berhingga *places*, $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, \dots, P_{100}\}$ yang menunjukkan tempat atau daerah yang dilalui oleh pesawat dalam pergerakan di Bandara Internasional Juanda dan jumlah token yang terdapat pada masing-masing *places* menunjukkan keberadaan pesawat. Sedangkan T merupakan himpunan berhingga transisi, $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, \dots, T_{157}\}$ yang menunjukkan *event* atau pergerakan pesawat saat *landing* atau pendaratan yang dimulai dari posisi pesawat di wilayah *approach* (siap untuk *landing*) hingga menuju *parking stand* yang di tuju oleh pesawat, dan pergerakan pesawat saat *take off* yang dimulai dari wilayah *parking stand* hingga menuju ke *runway* dan kemudian melakukan *take off* atau lepas landas meninggalkan Bandara Internasional Juanda.



Gambar 2. Model petri net pergerakan pesawat pada arah *runway* 10

Gambar 2 menunjukkan posisi pesawat di Bandara Internasional Juanda pada pukul 07.00 WIB pada tanggal 6 Januari 2023 yang di modelkan dengan Petri net.

Terdapat sebuah *token* pada masing-masing *place* $P_3, P_4, P_{17}, P_{21}, P_{36}, P_{67}, P_{72}, P_{88}, P_{89}, P_{92}$, dan P_{98} dari model petri net pada Gambar 2 yang diinterpretasikan sebagai pesawat pada posisi tertentu. Keadaan ini berdasarkan *observasi* dari peneliti dan *flight schedule* pada tanggal 6 Januari 2023 pukul 07.00 WIB yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. *Flight schedule* pada tanggal 6 Januari 2023

Terminal	Flight No	Arrival	Departure	STD (LT)	Posisi	Place
Terminal I (Apron Utara)	QG608		Denpasar	07.45	PS4	P_{36}
	SJY-554		Cengkareng	07.00	N1	P_{67}
	JT-749		Cengkareng	07.35	PS14	P_{21}
	JT-577	Exron	Cengkareng	07.00	runway	P_{72}
	JT-316		Banjarmasin	07.10	PS16	P_{17}
	JT-2910		Denpasar	07.10	PS29	P_3
	IW-1843		Jogjakarta	07.10	PS27	P_4
Terminal II (Apron Selatan)	QZ7696		Cengkareng	06.50	PSA6	P_{92}
	GA-338	Exron	Denpasar	07.25	PSA2	P_{88}
	GA-368		Semarang	07.40	PSA3	P_{89}
	GA-854		Singapore	07.30	PSA12	P_{98}

Pada Gambar 2 model petri net terdiri dari 100 *places* dan 157 transisi sehingga matriks *incidence* ($D_p = D^+ - D^-$) pada model Petri net berukuran 100×157 . Pada awalnya pesawat berada pada posisi di *parking stand* nomor 4 (P_{36}), *Nopember One* (*place* P_{67}), *parking stand* nomor 14 (*place* P_{21}), *runway* (*place* P_{72}), *parking stand* nomor 16 (*place* P_{17}), *parking stand* nomor 29 (*place* P_3), *parking stand* nomor 27 (*place* P_4), *parking stand alfa* nomor 6 (*place* P_{92}), *parking stand alfa* nomor 2 (*place* P_{88}), *parking stand alfa* nomor 3 (*place* P_{89}), dan *parking stand alfa* nomor 12 (*place* P_{98}) sehingga penanda awalnya adalah

$$\mu_{p0} = [\mu_1 \ \mu_2 \ \mu_3 \ \mu_4 \ \mu_5 \ \dots \ \mu_{17} \ \mu_{18} \ \mu_{19} \ \mu_{20} \ \mu_{21} \ \mu_{22} \ \dots$$

$$\mu_{36} \ \mu_{37} \ \dots \ \mu_{67} \ \mu_{68} \ \mu_{69} \ \mu_{70} \ \mu_{71} \ \mu_{72} \ \dots \ \mu_{88} \ \mu_{89} \ \mu_{90}$$

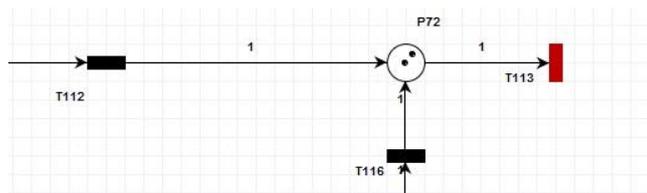
$$\mu_{91} \ \mu_{92} \ \dots \ \mu_{98} \ \mu_{99} \ \mu_{100}]^T$$

$$\mu_{p0} = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 1$$

$$0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ \dots \ 1 \ 0 \ 0]^T$$

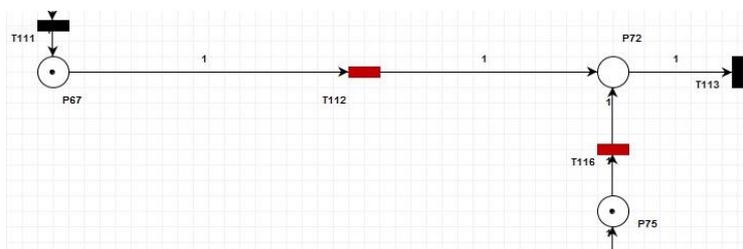
Gambar 2 menunjukkan keadaan awal petri net, transisi $T_5, T_8, T_{34}, T_{42}, T_{112}, T_{113}, T_{115}, T_{133}, T_{135}, T_{141}$ dan T_{153} dalam keadaan *enabled* (berwarna merah). Transisi T_5 *enabled* karena *place* P_3 yang menjadi input dari transisi T_5 mempunyai token sama dengan jumlah token minimum yang dibutuhkan oleh transisi T_5 . Hal ini menunjukkan bahwa pesawat di *parking stand* nomor 29 (*place* P_3) siap bergerak menuju ke arah *runway* 10 (*place* P_{72}) dan siap untuk melakukan *take off*. Kondisi yang sama juga terjadi pada *parking stand* nomor 27

(place P_4), parking stand nomor 16 (place P_{17}), parking stand nomor 14 (place P_{21}), dan parking stand nomor 4 (place P_{36}) di terminal I. Pada place P_{72} terdapat token yang mengakibatkan transisi T_{113} dalam keadaan *enabled*. Dari terminal II ada 4 transisi yang *enabled* yakni transisi T_{133} , T_{135} , T_{141} dan T_{153} yang menunjukkan ada empat pesawat (berisi token pada place P_{88} , P_{89} , P_{92} , dan P_{98}) yang siap untuk melakukan *take off*. Sedangkan transisi T_{115} *enabled* menunjukkan bahwa ada pesawat yang akan menuju ke Bandara Internasional Juanda dan bersiap untuk melakukan *landing* atau pendaratan. Transisi T_{112} dalam keadaan *enabled* sehingga dapat difire yang mengakibatkan pesawat di *Nopember One* (N1) atau place P_{67} bergerak menuju ke *runway* atau place P_{72} . Padahal di place P_{72} masih berisi satu token atau dalam hal ini masih terdapat pesawat di *runway*. Hal ini perlu dihindari dalam sistem, karena tidak boleh ada 2 pesawat atau lebih di di tempat yang sama, seperti di *runway* untuk melakukan *take off* secara bersamaan. Gambar 3 menunjukkan hal yang tidak diperbolehkan terjadi dalam sistem karena di *runway* atau place P_{72} ada 2 token.



Gambar 3. Place P_{72} berisi 2 token

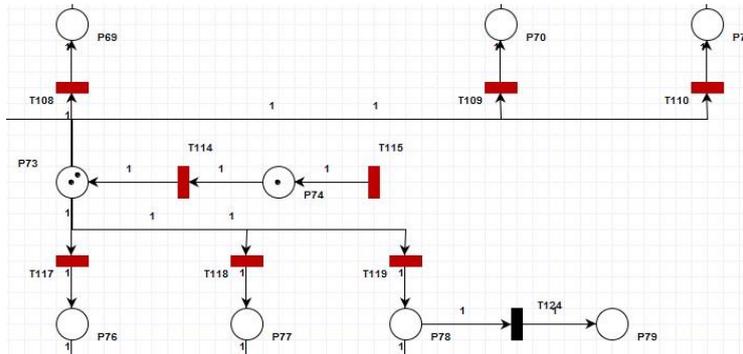
Selain kondisi di atas, ada kemungkinan bahwa pesawat dari terminal I dan terminal II bertemu di *runway* (transisi T_{112} dan transisi T_{116} dalam keadaan *enabled*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Hal ini terjadi karena tidak adanya pembatas pada pemfirean transisi T_{112} dan transisi T_{116} sehingga place P_{72} dapat berisi lebih dari satu token. Padahal kondisi sebenarnya, hanya sebuah pesawat yang diperbolehkan di *runway* untuk melakukan *landing* atau *take off*, sehingga perlu adanya tambahan place yang membatasi penanda di place P_{72} agar berisi satu token.



Gambar 4. Transisi T_{112} dan transisi T_{116} dalam keadaan *enabled*

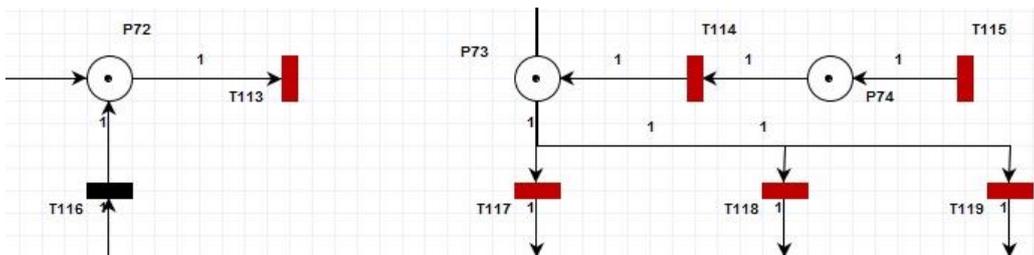
Kondisi yang sama juga terjadi pada place P_{73} . Ada kemungkinan bahwa pada model Petri net (gambar 5) di place P_{73} terdapat 2 token atau lebih karena tidak ada batasan dari pemfirean transisi T_{115} dan T_{114} atau dalam hal ini adalah pesawat yang menuju ke Bandara

Internasional Juanda (*landing*). Sehingga perlu adanya adanya tambahan *place* yang membatasi penanda di *place* P_{73} agar berisi satu token.



Gambar 5. *Place* P_{73} berisi 2 token

Selain itu, hal yang tidak boleh terjadi pada sistem adalah pesawat yang siap *landing* (*pemfirean* transisi T_{114}) yang menuju ke *runway* (adanya token di *place* P_{73}) akan bertemu dengan pesawat yang *take off* di *runway* (adanya token di *place* P_{72}), seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. *Place* P_{72} dan *place* P_{73} berisi satu token

Sehingga perlu adanya tambahan *place* yang bertindak sebagai *controller* pada model petri net Gambar 2. Tujuan *place controller* itu sendiri adalah

- 1) Untuk memastikan bahwa *place* P_{72} dan *place* P_{73} , yang merupakan interpretasi dari *runway* dan hanya diisi oleh satu token atau hanya ada satu pesawat dalam *runway* di bandara untuk melakukan *take off* maupun *landing*.
- 2) Untuk menjamin bahwa ketika *place* P_{72} diisi oleh satu token maka sistem akan *disabled*kan transisi T_{114} atau dalam hal ini adalah saat ada pesawat sedang melakukan *take off* di *runway* maka pesawat yang siap *landing* tidak diperbolehkan menuju ke *runway* (*bermanuever* di udara menunggu antrian di *runway*).
- 3) Untuk menjamin bahwa ketika *place* P_{73} diisi oleh satu token maka transisi T_{112} dan T_{116} dalam keadaan *disabled* atau dalam hal ini sistem tidak mengizinkan transisi T_{112} dan T_{116} untuk *difire*, karena ada pesawat di *runway* yang melakukan *landing* atau pendaratan sehingga pesawat dari terminal I maupun terminal II yang akan menuju ke *runway* untuk melakukan *take off* berhenti di *Nopember One* (N1) dan *September One* (S1), untuk

menunggu pesawat di *runway* selesai melakukan *landing* dan bergerak menuju ke *exit taxiway*.

- 4) Memastikan bahwa *parking stand* dan daerah yang dilalui oleh pesawat dalam melakukan *take off* maupun *landing* hanya diisi oleh satu pesawat yang dalam hal ini di representasikan oleh *places* pada sistem yang hanya berisi oleh satu token (kecuali di *place P₇₉* dan *place P₈₁*).
- 5) Selain itu, *place controller* memastikan bahwa apabila *parking stand temporary* digunakan maka *parking stand* utama tidak berfungsi (tidak dapat diisi oleh pesawat) atau juga dalam keadaan sebaliknya, contohnya bila *place P₁₄* (*parking stand temporary* nomor 17B) sudah berisi token maka sistem akan *mendisabledkan* transisi *T₂₉*.
- 6) Mengatur pergerakan pesawat yang keluar dari *runway* dengan pesawat yang berjalan dari *apron* (terminal I) menuju ke *taxiway parallel*. Karena ada kemungkinan terjadi pertemuan dari arah yang berlawanan (terjadi *deadlock*) di *Nopember Three* (N3), *Nopember Four* (N4), *Nopember Five* (N5), dan *Nopember Six* (N6), sehingga perlu adanya tambahan *place* pada jalur tersebut yang bertindak sebagai *controller*. Artinya jika ada pesawat yang keluar dari *runway* dan menggunakan jalur atau *route exit taxiway Nopember Five* (N5) dan secara bersamaan bersamaan ada pesawat yang berjalan dari *apron* menuju ke *taxiway parallel* melalui *Nopember Five* (N5), sehingga pesawat yang keluar dari *runway* akan berhenti di *exit taxiway (place P₆₉)* sampai menunggu pesawat dari *apron* tiba di *taxiway parallel (place P₉₅)*. Hal yang sama juga terjadi pada jalur atau *route exit taxiway* untuk *Nopember Three* (N3), *Nopember Four* (N4), dan *Nopember Six* (N6).

Persyaratan di atas diterjemahkan ke dalam bentuk kendala atau pembatas pada pertidaksamaan berikut ini, yang kemudian menjadi persamaan dengan menambahkan *variabel slack* ke dalamnya.

- 1) *Parking stand* pada tiap terminal (terminal I dan Terminal II) hanya diisi oleh satu pesawat

$$\begin{array}{ll} \mu_1 \leq 1 & \Rightarrow \mu_1 + \mu_{c_1} = 1 \\ \mu_2 \leq 1 & \Rightarrow \mu_2 + \mu_{c_2} = 1 \\ \mu_3 \leq 1 & \Rightarrow \mu_3 + \mu_{c_3} = 1 \\ \mu_4 \leq 1 & \Rightarrow \mu_4 + \mu_{c_4} = 1 \\ \mu_5 \leq 1 & \Rightarrow \mu_5 + \mu_{c_5} = 1 \\ \mu_6 \leq 1 & \Rightarrow \mu_6 + \mu_{c_6} = 1 \\ \mu_7 \leq 1 & \Rightarrow \mu_7 + \mu_{c_7} = 1 \\ \mu_8 \leq 1 & \Rightarrow \mu_8 + \mu_{c_8} = 1 \\ \mu_9 \leq 1 & \Rightarrow \mu_9 + \mu_{c_9} = 1 \\ \mu_{10} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{10} + \mu_{c_{10}} = 1 \end{array}$$

$$\begin{aligned}\mu_{11} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{11} + \mu_{c_{11}} &= 1 \\ \mu_{12} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{12} + \mu_{c_{12}} &= 1 \\ \mu_{13} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{13} + \mu_{c_{13}} &= 1 \\ \mu_{14} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{14} + \mu_{c_{14}} &= 1 \\ \mu_{15} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{15} + \mu_{c_{15}} &= 1 \\ \mu_{16} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{16} + \mu_{c_{16}} &= 1 \\ \mu_{17} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{17} + \mu_{c_{17}} &= 1 \\ \mu_{18} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{18} + \mu_{c_{18}} &= 1 \\ \mu_{19} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{19} + \mu_{c_{19}} &= 1 \\ \mu_{20} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{20} + \mu_{c_{20}} &= 1 \\ \mu_{21} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{21} + \mu_{c_{21}} &= 1 \\ \mu_{22} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{22} + \mu_{c_{22}} &= 1 \\ \mu_{23} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{23} + \mu_{c_{23}} &= 1 \\ \mu_{24} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{24} + \mu_{c_{24}} &= 1 \\ \mu_{25} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{25} + \mu_{c_{25}} &= 1 \\ \mu_{26} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{26} + \mu_{c_{26}} &= 1 \\ \mu_{27} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{27} + \mu_{c_{27}} &= 1 \\ \mu_{28} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{28} + \mu_{c_{28}} &= 1 \\ \mu_{29} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{29} + \mu_{c_{29}} &= 1 \\ \mu_{30} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{30} + \mu_{c_{30}} &= 1 \\ \mu_{31} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{31} + \mu_{c_{31}} &= 1 \\ \mu_{32} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{32} + \mu_{c_{32}} &= 1 \\ \mu_{33} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{33} + \mu_{c_{33}} &= 1 \\ \mu_{34} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{34} + \mu_{c_{34}} &= 1 \\ \mu_{35} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{35} + \mu_{c_{35}} &= 1 \\ \mu_{36} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{36} + \mu_{c_{36}} &= 1 \\ \mu_{37} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{37} + \mu_{c_{37}} &= 1 \\ \mu_{38} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{38} + \mu_{c_{38}} &= 1 \\ \mu_{39} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{39} + \mu_{c_{39}} &= 1 \\ \mu_{40} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{40} + \mu_{c_{40}} &= 1 \\ \mu_{87} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{87} + \mu_{c_{41}} &= 1 \\ \mu_{88} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{88} + \mu_{c_{42}} &= 1 \\ \mu_{89} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{89} + \mu_{c_{43}} &= 1 \\ \mu_{90} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{90} + \mu_{c_{44}} &= 1 \\ \mu_{91} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{91} + \mu_{c_{45}} &= 1 \\ \mu_{92} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{92} + \mu_{c_{46}} &= 1 \\ \mu_{93} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{93} + \mu_{c_{47}} &= 1 \\ \mu_{94} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{94} + \mu_{c_{48}} &= 1 \\ \mu_{95} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{95} + \mu_{c_{49}} &= 1 \\ \mu_{96} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{96} + \mu_{c_{50}} &= 1 \\ \mu_{97} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{97} + \mu_{c_{51}} &= 1 \\ \mu_{98} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{98} + \mu_{c_{52}} &= 1 \\ \mu_{99} &\leq 1 &\Rightarrow \mu_{99} + \mu_{c_{53}} &= 1\end{aligned}$$

$$\mu_{100} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{100} + \mu_{c_{54}} = 1$$

- 2) Apabila *parking stand temporary* digunakan maka *parking stand* utama tidak berfungsi (tidak dapat diisi oleh pesawat) atau juga dalam keadaan sebaliknya.

$$\mu_{14} + \mu_{15} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{14} + \mu_{15} + \mu_{c_{55}} = 1$$

$$\mu_{15} + \mu_{16} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{15} + \mu_{16} + \mu_{c_{56}} = 1$$

$$\mu_{18} + \mu_{19} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{18} + \mu_{19} + \mu_{c_{57}} = 1$$

$$\mu_{19} + \mu_{20} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{19} + \mu_{20} + \mu_{c_{58}} = 1$$

$$\mu_{25} + \mu_{26} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{25} + \mu_{26} + \mu_{c_{59}} = 1$$

$$\mu_{30} + \mu_{31} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{30} + \mu_{31} + \mu_{c_{60}} = 1$$

$$\mu_{32} + \mu_{33} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{32} + \mu_{33} + \mu_{c_{61}} = 1$$

$$\mu_{33} + \mu_{34} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{33} + \mu_{34} + \mu_{c_{62}} = 1$$

$$\mu_{35} + \mu_{36} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{35} + \mu_{36} + \mu_{c_{63}} = 1$$

$$\mu_{36} + \mu_{37} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{36} + \mu_{37} + \mu_{c_{64}} = 1$$

- 3) *Runway* atau landasan pacu hanya diisi oleh satu pesawat

$$\mu_{72} + \mu_{73} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{72} + \mu_{73} + \mu_{c_{65}} = 1$$

$$\mu_{74} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{74} + \mu_{c_{66}} = 1$$

- 4) Pergerakan pesawat menuju atau keluar *runway* melalui *Nopember Three* (N3)

$$\mu_{68} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{68} + \mu_{c_{67}} = 1$$

$$\mu_{41} + \mu_{51} + \mu_{59} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{41} + \mu_{51} + \mu_{59} + \mu_{c_{68}} = 1$$

$$\mu_{42} + \mu_{52} + \mu_{60} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{42} + \mu_{52} + \mu_{60} + \mu_{c_{69}} = 1$$

Karena pesawat yang keluar dari *runway* dan pesawat dari *apron* menuju *runway paralel* melalui jalur yang sama pada *Nopember Three* (N3), dengan demikian kita dapat mereduksi pembatas yang melibatkan $\mu_{41} + \mu_{51} + \mu_{59} \leq 1$ dan $\mu_{42} + \mu_{52} + \mu_{60} \leq 1$ menjadi pembatas yang tunggal

$$\mu_{41} + \mu_{42} + \mu_{51} + \mu_{52} + \mu_{59} + \mu_{60} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{41} + \mu_{42} + \mu_{51} + \mu_{52} + \mu_{59} + \mu_{60} + \mu_{c_{68}} = 1$$

- 5) Pergerakan pesawat menuju atau keluar *runway* melalui *Nopember Four* (N4)

$$\mu_{43} + \mu_{44} + \mu_{53} + \mu_{54} + \mu_{59} + \mu_{60} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{43} + \mu_{44} + \mu_{53} + \mu_{54} + \mu_{59} + \mu_{60} + \mu_{c_{69}} = 1$$

- 6) Pergerakan pesawat menuju atau keluar melalui *Nopember Five* (N5)

$$\mu_{69} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{69} + \mu_{c_{70}} = 1$$

$$\mu_{45} + \mu_{46} + \mu_{55} + \mu_{56} + \mu_{61} + \mu_{62} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{45} + \mu_{46} + \mu_{55} + \mu_{56} + \mu_{61} + \mu_{62} + \mu_{c_{71}} = 1$$

- 7) Pergerakan pesawat menuju atau keluar melalui *Nopember Six* (N6), *Nopember Seven* (N7), dan *Nopember Eight* (N8)

$$\mu_{70} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{70} + \mu_{c_{72}} = 1$$

$$\mu_{71} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{71} + \mu_{c_{73}} = 1$$

$$\mu_{47} + \mu_{48} + \mu_{49} + \mu_{50} + \mu_{57} + \mu_{58} + \mu_{63} + \mu_{64} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \mu_{47} + \mu_{48} + \mu_{49} + \mu_{50} + \mu_{57} + \mu_{58} + \mu_{63} + \mu_{64} + \mu_{c_{74}} = 1$$

8) Pergerakan pesawat menuju *Siera Five* (S5), *Siera Four* (S4), *Siera Three* (S3), *Siera Two* (S2)

$$\begin{aligned} \mu_{76} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{76} + \mu_{c_{75}} = 1 \\ \mu_{77} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{77} + \mu_{c_{76}} = 1 \\ \mu_{78} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{78} + \mu_{c_{77}} = 1 \\ \mu_{82} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{82} + \mu_{c_{78}} = 1 \\ \mu_{83} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{83} + \mu_{c_{79}} = 1 \\ \mu_{84} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{84} + \mu_{c_{80}} = 1 \\ \mu_{85} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{85} + \mu_{c_{81}} = 1 \end{aligned}$$

9) Pergerakan pesawat menuju *Siera Six* (S6) dan *Siera One* (S1)

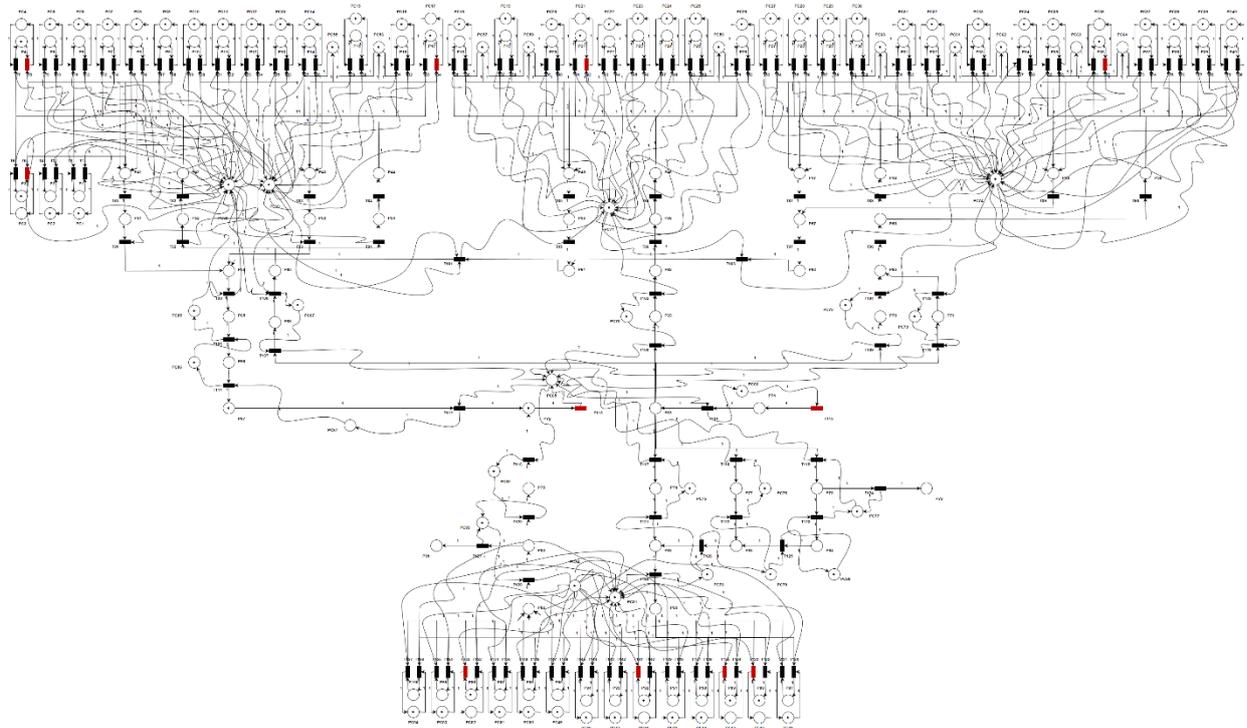
$$\begin{aligned} \mu_{75} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{75} + \mu_{c_{82}} = 1 \\ \mu_{80} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{80} + \mu_{c_{83}} = 1 \\ \mu_{86} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{86} + \mu_{c_{84}} = 1 \end{aligned}$$

10) Pergerakan pesawat menuju *Nopember One* (N1)

$$\begin{aligned} \mu_{65} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{65} + \mu_{c_{85}} = 1 \\ \mu_{66} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{66} + \mu_{c_{86}} = 1 \\ \mu_{67} \leq 1 & \Rightarrow \mu_{67} + \mu_{c_{87}} = 1 \end{aligned}$$

Delapan puluh tujuh *variabel slack* yang ditambahkan ke dalam persamaan di atas sesuai dengan delapan puluh tujuh *places controller* yang ditambahkan kedalam model Petri net pergerakan pesawat melalui *runway 10* pada Gambar 2, yaitu:

$$\mu_c = [\mu_{c_1} \ \mu_{c_2} \ \mu_{c_3} \ \mu_{c_4} \ \mu_{c_5} \ \mu_{c_6} \ \dots \ \mu_{c_{86}} \ \mu_{c_{87}}]^T$$



Gambar 7. *Controlled system* model petri net pergerakan pesawat pada arah *runway 10*

Matriks *incidence controller* net dan penanda pada *place controller* (μ_{c0}) dapat dihitung berdasarkan $D_c = -LD_p$ dan $\mu_{c0} = b - L\mu_{p0}$ (Moody & Antsaklis, 1998). Elemen positif pada matriks D_c merupakan *arc* yang menghubungkan transisi ke *place controller*, sedangkan elemen negatif merupakan *arc* dari *controller place* ke transisi. Hasil graph petri net dari *controlled system* ditunjukkan pada Gambar 7. Untuk selanjutnya mengenai simulasi dari model petri net tersebut akan digunakan *toolbox* Petri net dan Aljabar Max-Plus pada aplikasi Scilab (Subiono, 2015).

Simpulan dan Saran

Kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut

- a. Sistem pengaturan pergerakan pesawat terbang di Bandara Internasional Juanda dapat dimodelkan menggunakan petri net dengan 187 *places* dan 157 transisi pada arah *runway* 10. Pesawat terbang tersebut dimisalkan oleh sebuah token atau dot. *Places* menunjukkan tempat atau daerah yang dilalui pesawat dan transisi menunjukkan pergerakan pesawat saat *landing* atau *take off*.
- b. Petri net dapat memodelkan pengaturan pergerakan pesawat terbang di bandara dengan mencegah terjadinya insiden atau tabrakan antar pesawat, yang ditunjukkan dengan setiap *places* hanya berisi satu token, yang dalam hal ini *places controller* bertindak sebagai *supervisor* dengan tujuan mencegah token untuk memasuki *places* yang sama.

Referensi

- Anggraeni, D. A. (2013). *Pemodelan Jadwal Keberangkatan Pesawat Transit Di Bandara Dengan Menggunakan Aljabar Maxplus*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Angkasa Pura. (2015). *Annual Report 2015*. Surabaya: PT Angkasa Pura I Persero.
- Antarnews.com. (2024, January 6). *Bandara Juanda Layani 14 Juta Penumpang Selama 2023*. Antara News. <https://www.antarnews.com/berita/3902823/bandara-juanda-layani-14-juta-penumpang-selama-2023>
- Ekonomi.bisnis.com. (2023, January 9). *Ini Rute-Rute Tersibuk di Bandara Soekarno-Hatta Sepanjang 2022*. <https://ekonomi.bisnis.com/read/20230109/98/1616250/ini-rute-rute-tersibuk-di-bandara-soekarno-hatta-sepanjang-2022>
- Fendiyanto, P. (2019). Menghitung Kapasitas Runway Menggunakan Petri Net Dan Aljabar Max-Plus. *Primatika: Jurnal Pendidikan Matematika*, 8, 101–110. <https://doi.org/10.30872/primatika.v8i2.145>
- Giua, A., & Seatzu, C. (2015). Petri Nets for The Control of Discrete Event Systems. *Software and Systems Modeling (Sosym)*, 14(2), 693–701. <https://doi.org/10.1007/s10270-014-0425-1>

- Moody, J. O., & Antsaklis, P. J. (1998). *Supervisory Control of Discrete Event Systems Using Petri Nets*. Kluwer Academic Publishers.
- Nevan. (2021). *Penjadwalan Pesawat Terbang yang Transit di Bandara Internasional Soekarno-Hatta Jakarta Dengan Menggunakan Sistem Linear Max-Plus*. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan.
- Oktavianto, K. (2013). *Implementasi Aljabar Max-Plus Pada Pemodelan Dan Penjadwalan Keberangkatan Bus Kota DAMRI (Studi Kasus Di Surabaya)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Panguriseng, Z. A. (2010). *Penentuan Jumlah Exit Taxiway Berdasarkan Variasi Jenis Pesawat Dan Kerapatan Jadwal Penerbangan Pada Bandara Internasional Juanda Surabaya*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Prasetya, A., Rintawati, D., & Sari, C. (2023). Analisis Kapasitas Infrastruktur Udara Bandara Internasional Juanda Surabaya. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan*, 1(2), Article 2. <https://doi.org/10.25105/jrltb.v1i2.17843>
- Rahayuningtyas, W. A. (2020). *Simulasi Pergerakan Pesawat Terhadap Letak, Jumlah, dan Sudut Exit Taxiway Pada Bandar Udara Internasional Juanda Untuk Meningkatkan Kapasitas Runway*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ramadge, P., & Wonham, W. (1989). The Control of Discrete Event Systems. *Proceedings of the IEEE*, 77, 81–98. <https://doi.org/10.1109/5.21072>
- Subiono. (2015). *Aljabar Min-Max Plus dan Terapannya*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Utomo, T. (2015). *Struktur Hirarkis Jalur Kereta Api Semi Double Track Menggunakan Petri Net Dan Aljabar Max-Plus*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.