

Analisis Topologi Jaringan Penerbangan Indonesia Menurut PM 88 Tahun 2013

Topology Analysis of Indonesia Air Transport Network Based on PM 88 2013

Javensius Sembiring^{1)*}, Taufiq Mulyanto¹⁾, Luqman Fathurrohman¹⁾, Lita Yarlina²⁾, dan Novyanto Widadi²⁾

¹Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132

²Puslitbang Transportasi Udara, Badan Kebijakan Transportasi, Kementerian Perhubungan,

Jl. Medan Merdeka Timur no.5, Gambir Jakarta 10110

*Corresponding author: javen.sembiring@itb.ac.id

INFO ARTIKEL

Histori Artikel:

Diterima: 14 November 2021

Direvisi: 15 Maret 2022

Disetujui: 30 Mei 2022

Dipublikasi Online: Juni 2022

Keywords:

Air transportation network, PM 88 2013, route, topology

Kata kunci:

Jaringan transportasi udara, PM 88 tahun 2013, rute, topologi

Permalink/DOI:

<https://dx.doi.org/10.25104/wa.v48i1.445.15-24>

©2021 Puslitbang Transportasi Udara, Badanlitbang

Perhubungan-Kementerian Perhubungan RI. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

ABSTRACT / ABSTRAK

This paper presents the modeling of the domestic air transportation network as regulated based on PM 88 2013 in terms of its topology. Topology analysis is carried out both from the network and the airport's role point of view. Based on the network analysis, it is found that one airport is connected on average with 7 other airports, the farthest route can be reached by 6 flights, the network resembles the power-law distribution, and two airports can be reached on average by 3 flights. Meanwhile, in terms of the airport's role, it was found that CGK, SUB, UPG, AMQ, MDC, DPS, BPN, and KNO airports have a significant contribution to the analyzed network. The significant contribution of each airport is quantified by some metrics such as degree of centrality, betweenness centrality, eigenvector centrality, and page rank.

Penelitian ini memodelkan jaringan penerbangan domestik yang diatur dalam PM 88 Tahun 2013 dari sisi topologinya. Analisis topologi dilakukan baik dari sisi sistem jaringan sebagai satu jaringan yang terintegrasi dan analisis dari sisi peran bandara yang secara signifikan berpengaruh terhadap jaringan. Berdasarkan analisis jaringan sebagai sistem yang terintegrasi diperoleh bahwa satu bandara terkoneksi rata-rata dengan 7 bandara lainnya, rute terjauh dapat dijangkau dengan 6 kali penerbangan, jaringan mengikuti distribusi *power-law*, dua bandara rata-rata dapat ditempuh dengan 3 kali penerbangan. Sedangkan dari sisi peran bandara diperoleh bahwa bandara CGK, SUB, UPG, AMQ, MDC, DPS, BPN, dan KNO memiliki kontribusi yang sangat penting bagi jaringan domestik berjadwal seperti yang diatur dalam PM 88 Tahun 2013. Kontribusi per bandara ini diukur melalui metrik seperti *degree of centrality*, *betweenness centrality*, *eigenvector centrality*, dan *page rank*.

PENDAHULUAN

Jaringan dan rute penerbangan di Indonesia diatur berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan (PM) Nomor 88 Tahun 2013. Peraturan ini menggantikan Keputusan Menteri Perhubungan Nomor 126 Tahun 1990 tentang Rute Penerbangan. Namun sejak dikeluarkannya PM 88 Tahun 2013, belum ada peraturan baru yang diterbitkan oleh Kementerian Perhubungan hingga saat penelitian ini ditulis pada tahun 2021.

Berdasarkan PM 88 Tahun 2013, rute penerbangan didefinisikan sebagai lintasan pesawat udara dari bandar udara asal ke bandar udara tujuan melalui jalur penerbangan yang ditetapkan. Sedangkan jaringan didefinisikan sebagai gabungan dari beberapa rute penerbangan yang merupakan satu kesatuan pelayanan angkutan udara (Newman, 2010). Merujuk kepada PM 88 Tahun 2013, jaringan penerbangan di Indonesia dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu jaringan penerbangan dalam negeri dan jaringan penerbangan luar negeri. Penerbangan dalam negeri terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu berdasarkan struktur rute dan pemanfaatan rute penerbangan. Struktur rute penerbangan sendiri dibagi menjadi tiga kategori,

1. Rute utama. Rute utama dibagi berdasarkan skalanya, yaitu skala primer, sekunder, dan tersier;
2. Rute pengumpan. Rute pengumpan dibagi menjadi dua kategori, yaitu rute yang menghubungkan bandara pengumpul dan pengumpan dan kategori kedua adalah rute yang menghubungkan antara bandara pengumpan;
3. Rute perintis. Pada rute perintis tidak ada pembagian seperti pada rute utama dan rute pengumpan. Secara umum rute perintis menghubungkan daerah terpencil.

Berdasarkan pemanfaatan rute penerbangan, jaringan penerbangan di Indonesia dibagi menjadi 4 kategori yaitu,

1. **Rute sangat padat.** Rute ini melayani penumpang dengan jumlah yang lebih besar dari 2,5 juta per tahun;
2. **Rute padat,** melayani penumpang dengan jumlah yang lebih besar dari 1,5 juta per tahun;
3. **Rute kurang padat,** melayani penumpang dengan jumlah yang lebih besar dari 250.000 penumpang per tahun;
4. **Rute tidak padat,** melayani penumpang dengan jumlah lebih kecil dari 250.000 penumpang per tahun.

Sedangkan untuk jaringan penerbangan luar negeri, tidak ada pembagian khusus seperti yang terdapat pada jaringan dalam negeri. Berdasarkan definisi rute yang terdapat pada PM 88 Tahun 2013, total rute berdasarkan pemanfaatannya sebesar 1.388 dengan 16 rute sangat padat, 8 rute padat, 82 rute kurang padat, dan 1282 rute tidak padat. Sedangkan berdasarkan strukturnya, total jumlah rute sebesar 1388 dengan 744 rute utama, 644 rute pengumpan dan 0 rute perintis untuk periode 2013 sampai 2017. Berdasarkan data statistik ini, PM 88 Tahun 2013 tidak mengatur rute yang termasuk dalam kategori rute perintis. Struktur jaringan penerbangan Indonesia berdasarkan PM 88 Tahun 2013 ditampilkan dalam bagan pada **Gambar 1**.

Berdasarkan studi literatur yang dilakukan oleh penulis, belum ada kajian jaringan penerbangan di Indonesia yang dilakukan dari sisi struktur/topologi jaringannya sehingga evaluasi secara menyeluruh dan terintegrasi sulit untuk dilakukan. Hal ini tentunya juga akan menghambat proses perencanaan dan pengembangan jaringan transportasi udara Indonesia di masa datang.

Oleh sebab itu, penelitian ini akan membahas evaluasi jaringan penerbangan Indonesia yang secara khusus difokuskan pada jaringan penerbangan domestik berjadwal. Sebagai kajian awal, kajian dari sisi topologinya akan dilakukan terhadap rute dan jaringan yang ditetapkan oleh Pemerintah melalui PM 88 Tahun 2013.

Evaluasi akan dilakukan berdasarkan metrik yang umumnya digunakan sebagai parameter dalam menilai sebuah jaringan.

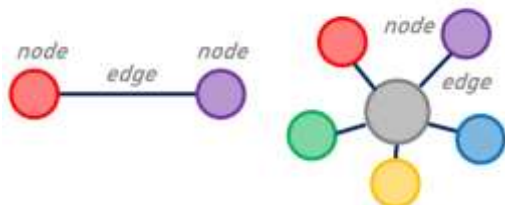
jaringan *directed*, pasangan antar *node* tidak sama artinya koneksi antara dua *node* $G(i, j)$ tidak sama dengan koneksi $G(j, i)$. Dituliskan sebagai,



Gambar 1. Struktur jaringan penerbangan dalam dan luar negeri berdasarkan PM 88 tahun 2013
Sumber: Diolah

TINJAUAN PUSTAKA

Di dalam teori analisis jaringan, sebuah jaringan didefinisikan sebagai gabungan dari titik (*node*) yang dihubungkan oleh garis (*edge*) (Newman, 2010) seperti terlihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Struktur Dasar Jaringan
Sumber: Diolah

Beberapa contoh jaringan seperti pada jaringan internet dengan komputer/router sebagai *node*-nya dan kabel/nirkabel sebagai *edge*-nya, jaringan pertemanan dimana orang-orang berperan sebagai *node*-nya dan pertemanan sebagai *edge*-nya, dan jaringan-jaringan lainnya baik yang terbentuk secara alamiah maupun buatan.

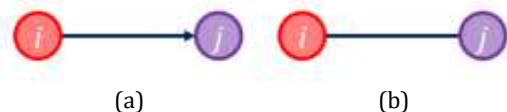
Selain konsep *node* dan *edge* seperti yang dipaparkan di atas, dalam jaringan juga dikenal istilah jaringan *directed* dan *undirected* (Albert & Barabasi, 2002). Untuk

$$G(i, j) \neq G(j, i) \quad (1)$$

Sedangkan untuk jaringan *undirected*, hubungan antara dua *node* $G(i, j)$ sama dengan $G(j, i)$.

$$G(i, j) = G(j, i) \quad (2)$$

Kedua jenis jaringan ini divisualisasikan dalam Gambar 2 berikut ini.



Gambar 3. Representasi jaringan (a) *directed* dan (b) *undirected*.

Sumber: Diolah

Jaringan dengan tingkat kompleksitas yang tinggi membutuhkan analisis yang mendalam dan menyeluruh dengan melihat jaringan sebagai sebuah sistem yang terintegrasi. Analisis dengan melihat *node* per *node* akan membutuhkan waktu yang lama dan banyak informasi yang hilang karena analisis yang dilakukan tidak melihat jaringan

secara utuh (Couto, Silva, Ruiz, & Benevenuto, 2015). Oleh sebab itu, analisis jaringan penerbangan akan dilakukan berdasarkan analisis topologinya.

Beberapa metrik akan digunakan sebagai dasar untuk mengukur struktur suatu jaringan. Secara umum, metrik ini dibagi menjadi dua kelompok besar. Kelompok pertama adalah ukuran/metrik yang digunakan untuk mengevaluasi jaringan sebagai sebuah sistem yang terintegrasi, sedangkan kelompok kedua adalah metrik yang digunakan untuk mengukur seberapa penting suatu *node* dalam sebuah jaringan.

Kelompok metrik pertama yang digunakan dalam mengevaluasi jaringan penerbangan ini di antaranya adalah *connected components*, *average connection*, *degree distribution*, *diameter*, *average weighted degree*, *average clustering coefficient*, dan *graph density* (Couto, Silva, Ruiz, & Benevenuto, 2015). Penjelasan singkat masing-masing metrik tersebut dijabarkan sebagai berikut: *Connected components* - mewakili jumlah bandar udara yang terhubung dalam suatu jaringan; *Average connection* - parameter yang dapat digunakan untuk mengukur rata-rata konektivitas bandara di dalam suatu jaringan; *Degree distribution* - parameter untuk mengukur jenis distribusi suatu jaringan. Pada umumnya jaringan-jaringan yang ada cenderung mengikuti *power law distribution* yaitu *node* dengan *degree* yang tinggi berjumlah sedikit dan *node* yang dengan *degree* yang rendah berjumlah banyak; *Diameter* - mengukur jumlah maksimum penerbangan dalam menghubungkan kota terjauh; *Average weighted degree* - mengukur frekuensi dan jumlah penumpang pada suatu rute; *Average shortest path* - mengukur penerbangan rata-rata yang dibutuhkan dalam menghubungkan satu bandara ke bandara lainnya dalam suatu jaringan; *Average clustering coefficient* - mengukur konektivitas suatu bandara; *Graph density* - mengukur kepadatan rute dalam jaringan.

Sedangkan metrik kelompok kedua meliputi,

Degree of centrality - mengukur jumlah pasangan koneksi ke bandara-bandara lainnya; *Eigenvector centrality* - variasi *degree of centrality* yang mengukur *centrality* masing-masing bandara yang berdekatan; *Betweenness centrality* - mengukur peran suatu bandara terutama perannya sebagai *gatekeeper*.

Penggunaan teori jaringan di atas telah banyak dilakukan untuk menganalisis topologi jaringan transportasi udara (Cheung & Gunes, 2012). Beberapa di antaranya dijabarkan sebagai berikut.

Couto G. S., dkk dalam penelitiannya yang berjudul *Structural Properties of the Brazilian Air Transportation Network* membahas secara detail mengenai topologi jaringan transportasi udara Brazil (Couto, Silva, Ruiz, & Benevenuto, 2015). Beberapa teori jaringan yang telah dibahas pada bagian awal Tinjauan Pustaka, diimplementasikan untuk memahami karakteristik topologi jaringan transportasi udara Brazil sebagai sebuah sistem yang terintegrasi. Pada penelitian ini, Couto G. S., dkk tidak hanya membahas jaringan penerbangan nasional namun juga penerbangan internasional yang dimasukkan sebagai bagian dari jaringan penerbangan Brazil. Melalui analisis dari sisi topologi diperoleh satu bandara dengan *degree* yang tinggi, baik dari sisi *centrality* dan *connected component*-nya. Melalui analisis yang dilakukan oleh Couto G.S. dkk ini ditemukan apabila terjadi penutupan pada bandara dengan *centrality* yang tinggi maka akan menyebabkan jaringan transportasi udara Brazil terbagi menjadi 6 subjaringan. Selain itu, melalui analisis topologi jaringan diperoleh bahwa jaringan transportasi udara Brazil mengikuti pola distribusi *Power-Law*. Melalui analisis topologi ini diharapkan dapat memberikan gambaran secara menyeluruh dari sisi topologi sehingga perencanaan terhadap pertumbuhan rute dan jaringan dapat diantisipasi di masa yang akan datang.

Cheung, dkk melakukan hal yang sama namun pada jaringan transportasi udara Amerika Serikat. Metrik topologi jaringan seperti *average shortest path*, *betweenness*

centrality, dan *resilience* diukur dan diperoleh melalui kajian topologi (Cheung & Gunes, 2012). Di dalam penelitian ini juga dibandingkan perubahan jaringan transportasi dalam dua dekade terakhir dan dibandingkan dengan kondisi pertumbuhan jaringan saat penelitian tersebut ditulis. Sama halnya dengan jaringan transportasi Brazil, jaringan transportasi Amerika Serikat juga mengikuti pola distribusi *Power-Law*.

Untuk Kawasan Benua Eropa secara khusus Negara Italia, kajian topologi jaringan penerbangan ini dilakukan oleh Guida, M., & Maria, F. (Guida & Maria, 2007). Kesimpulan yang hampir sama dengan dua jaringan sebelumnya diperoleh melalui kajian ini, seperti jaringan penerbangan udara Italia mengikuti distribusi *Power-Law* dengan beberapa bandara berperan sebagai *hub*. Namun hal yang menarik dari jaringan penerbangan di Italia adalah tidak ditemukannya subjaringan (kluster) seperti yang terdapat pada jaringan transportasi udara Brazil dan Amerika Serikat. Hal ini diperoleh melalui nilai *clustering coefficient* yang sangat kecil.

Analisis jaringan penerbangan di kawasan Asia secara khusus di Negara India dilakukan oleh Bagler, G. (Bagler, 2008). Berbeda dengan analisis jaringan di Brazil yang melibatkan jaringan penerbangan internasional, analisis topologi untuk Negara India hanya difokuskan untuk penerbangan domestik saja. Namun kesimpulan yang diperoleh hampir sama dengan kajian topologi di negara-negara lainnya.

Selain analisis topologi jaringan yang hanya membahas dari sisi struktur dan karakteristik jaringannya, analisis yang lebih mendalam dilakukan dengan menguji *robustness* jaringan secara keseluruhan. Kajian ini dilakukan secara komprehensif oleh Xiaoqian, S., dkk (Sun, Gollnick, & Wandelt, 2017). Kajian topologi dan uji *robustness* dilakukan untuk jaringan penerbangan dunia. Untuk uji *robustness* jaringan penerbangan udara dilakukan dengan menggunakan pendekatan *attacking strategy*. Dalam penelitian ini dilakukan 12 skenario *attacking*

strategy untuk menguji *robustness* jaringan penerbangan udara dunia.

Kajian mengenai *robustness* jaringan penerbangan dilakukan juga oleh Siozos-Rousoulis, L. dkk dalam penelitiannya yang diberi judul *A Study of the U.S Domestic Air Transportation Network: Temporal Evolution of Network Topology and Robustness from 2001 to 2016* (Siozos-Rousoulis, Robert, & Verbeke, 2021). Secara khusus penelitian ini mengambil kasus jaringan penerbangan di Amerika Serikat. Metrik *centrality* dihitung untuk masing-masing bandar udara dan kemudian penghapusan terhadap bandara-bandara dilakukan untuk mengukur tingkat toleransi jaringan terhadap skenario *targeted attack*. Dari hasil kajian ini dan dengan simulasi skenario *targeted attack* diperoleh bahwa jaringan penerbangan Amerika Serikat mengalami pemulihan yang relatif sangat cepat dan dengan cara yang efisien. Jaringan penerbangan Amerika Serikat yang relatif *robust* and efisien ini didorong oleh restrukturisasi besar-besaran sejak terjadinya serangan teroris 9 September 2001.

Pada penelitian ini, kajian yang akan dilakukan hanya meliputi topologi jaringan saja. Selain itu, kajian topologi jaringan penerbangan hanya diterapkan kepada perencanaan jaringan penerbangan di Indonesia yang ditetapkan melalui Peraturan Menteri 88 Tahun 2013 dan secara khusus untuk jaringan penerbangan domestik berjadwal. Metrik-metrik topologi jaringan baik untuk jaringan secara keseluruhan maupun metrik yang mengukur pentingnya bandara dalam satu jaringan yang telah dibahas di awal bab akan digunakan untuk mengevaluasi PM 88 Tahun 2013.

METODOLOGI

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai metode pengumpulan data yang dilakukan dalam rangka memperoleh data-data yang dibutuhkan, teknik dalam mengolah data, dan analisis terhadap data yang diperoleh.

Metode Pengumpulan Data

Jenis data yang digunakan dalam

penelitian ini adalah data sekunder berupa Peraturan Menteri 88 Tahun 2013. File PDF ini diperoleh melalui website resmi Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. Dalam file ini diperoleh rute-rute yang ditentukan oleh Pemerintah baik rute di dalam negeri maupun rute penerbangan luar negeri. Rute-rute ini kemudian membentuk jaringan penerbangan domestik dan internasional. Data lain yang digunakan dalam penelitian ini adalah data posisi (latituda dan longituda) masing-masing bandara yang terdapat pada PM 88 Tahun 2013. Data posisi diperoleh melalui database dari situs Our Airports (ourairports.com). Namun ada beberapa data bandara yang tidak terdapat pada database yang dirujuk sehingga dilengkapi dengan data dari Google Earth (earth.google.com).

Pengolahan Data

Data yang diperoleh kemudian diolah dan kemudian digunakan sebagai dasar untuk memodelkan topologi jaringan penerbangan berdasarkan PM 88 Tahun 2013. Langkah pertama yang dilakukan pada pengolahan data ini adalah dengan memetakan jaringan penerbangan di Indonesia sebagaimana yang ditentukan pada PM 88 seperti yang terlihat pada **Gambar 1**. Kajian pada penelitian ini difokuskan pada jaringan penerbangan dalam negeri. Oleh sebab itu, data bandara seperti latituda dan longituda serta nama bandara terkait dikumpulkan beserta rute-rute yang terbentuk antara bandara-bandara tersebut. Data-data ini kemudian ditampilkan dalam bentuk tabel untuk memudahkan dalam proses memodelkan topologi jaringan yang terbentuk.

Model topologi jaringan sendiri mengizinkan faktor pemberat pada setiap rute berupa nilai frekuensi penerbangan dan jumlah penumpang yang diangkut. Namun data jumlah penumpang dan frekuensi penerbangan tidak terdapat pada PM 88 Tahun 2013 karena hanya berisi mengenai perencanaan rute dari tahun 2013-2017. Oleh sebab itu, untuk menyederhanakan pemodelan topologinya, kedua parameter yang disebutkan di atas, tidak dimasukkan dalam pemodelan. Selain itu, asumsi arah rute *undirected* (lihat Gambar 3) juga digunakan dalam memodelkan topologi jaringan penerbangan berdasarkan PM 88 Tahun

2013.

Analisis Data

Data yang sudah diolah di atas, kemudian dianalisis dengan menggunakan program yang dapat memodelkan topologi jaringan. Ada beberapa pilihan program yang dapat digunakan dalam memodelkan dan menganalisis jaringan dari sisi topologinya seperti Gephi, NetworkX, iGraph, SNAP, Pajek, dan program lainnya baik yang berupa *open-source* maupun yang berbayar.

Pada penelitian ini digunakan alat bantu analisis berupa sebuah program berbasis *open-source* yang secara khusus diperuntukkan untuk menganalisis topologi jaringan. Program yang digunakan adalah Gephi (gephi.org). Program Gephi tidak terbatas hanya untuk jaringan transportasi udara, namun dapat dimanfaatkan untuk hampir semua jaringan seperti jaringan pertemanan di media sosial, jaringan komputer, dan jaringan-jaringan lainnya yang terbentuk secara alamiah.

Beberapa alasan digunakannya Gephi pada penelitian ini adalah karena Gephi merupakan program berbasis *open-source* dan tidak berbayar, memiliki tampilan antarmuka yang mudah dipahami, memiliki fitur dalam memvisualisasikan jaringan, dan memiliki dukungan peta permukaan bumi yang juga dapat diunduh secara gratis. Selain itu, Gephi juga dapat digunakan di berbagai *Operating System* (OS) sehingga memudahkan pekerjaan analisis apabila tim yang terlibat menggunakan OS yang berbeda-beda.

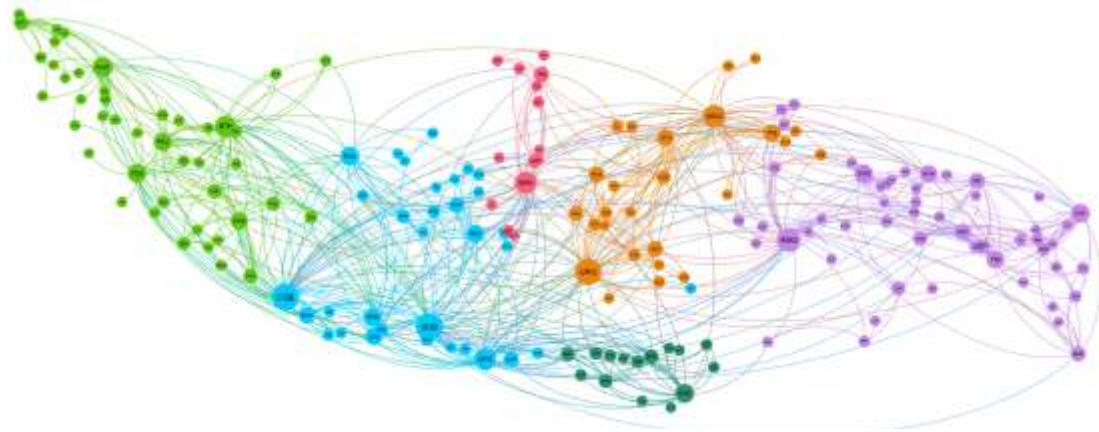
Fitur-fitur yang tersedia di dalam Gephi memudahkan analisis jaringan dan yang dapat diakses dengan mudah tanpa harus diprogram. Hasil pemodelan berupa metrik-metrik yang mengukur kinerja suatu jaringan juga dapat diperoleh dalam waktu yang relatif singkat. Waktu yang lama dibutuhkan hanya pada tahap persiapan data saja, yaitu pada saat mengubah format data agar sesuai dengan format input pada Gephi.

Data-data yang dimasukkan ke Gephi berupa data pasangan kota yang terdiri dari 694 rute *undirected*. Dari 694 rute ini terdapat 192 bandara unik yang dihubungkan oleh rute yang terbentuk. Hasil pemodelan topologi jaringan ini kemudian diperoleh dan ditampilkan pada bagian Hasil dan Pembahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengolahan data diperoleh nilai metrik jaringan sebagai satu sistem yang terintegrasi maupun bandara-

satu yang artinya semua bandara yang terdapat pada jaringan terkoneksi dengan membentuk distribusi *Power-Law (scale-free)* yaitu bandara dengan jumlah koneksi banyak berjumlah sedikit dan bandara yang koneksi rutinnya sedikit berjumlah banyak. Dalam



Sumber: Diolah

Gambar 2. Topologi jaringan penerbangan domestik berjadwal Indonesia dan klusternya

bandara yang memiliki peran yang cukup signifikan terhadap jaringan penerbangan domestik yang dimodelkan. Tabel 1 menampilkan hasil metrik topologi jaringan penerbangan domestik berjadwal yang diatur berdasarkan PM 88 Tahun 2013.

Tabel 1. Metrik topologi jaringan penerbangan domestik berdasarkan PM 88/2013

Metrik	Nilai
<i>Connected components</i>	192
<i>Average connection</i>	7,26 (3,8%)
<i>Degree distribution</i>	1, <i>scale-free</i>
<i>Diameter</i>	5
<i>Average shortest path</i>	2,9
<i>Average clustering coefficient</i>	0,74
<i>Number of clusters</i>	6
<i>Graph density</i>	0,038

Sumber: Diolah

Metrik-metrik di atas mewakili atribut jaringan penerbangan domestik Indonesia seperti yang diatur pada PM 88 Tahun 2013. *Connected components* mewakili bandara yang terkoneksi pada jaringan ini berjumlah 192 bandara. Metrik *average connection* mengukur rata-rata satu bandara dengan bandara lainnya. Angka 7 mengindikasikan pada jaringan yang dianalisis, satu bandara rata-rata terkoneksi dengan 7 bandara atau sekitar 3,8% dari jumlah total bandara yang ada. Sedangkan *degree distribution* bernilai

terminologi transportasi udara bandara dengan jumlah koneksi yang banyak disebut sebagai *hub* atau bandara pengumpul sedangkan bandara dengan jumlah koneksi yang sedikit disebut sebagai bandara *spoke* (pengumpan). Dalam banyak kajian jaringan, pada umumnya jaringan-jaringan yang terbentuk secara alamiah akan mengikuti *Power-Law distribution*.

Metrik berikutnya adalah diameter yang bernilai 5. Metrik ini menyatakan bahwa jaringan penerbangan domestik yang disusun di PM 88 Tahun 2013 ini memiliki rute terjauh yang dapat dijangkau dengan 5 kali penerbangan. Sedangkan nilai metrik *average shortest path* menyatakan jarak tempuh rata-rata satu bandara dengan bandara lainnya dalam jaringan ini dapat ditempuh dengan 3 kali penerbangan. Nilai *average clustering coefficient* menyatakan bahwa rata-rata satu bandara memiliki persentase terkoneksi dengan bandara lain sebesar 74%. Metrik berikutnya adalah *number of clusters* mewakili jumlah kluster yang terbentuk dalam jaringan ini sebanyak 6. Pada masing-masing kluster terdapat bandara-bandara yang berperan cukup besar, seperti pada kluster 1 terdapat bandara KNO, PDG, BTH, dan PLM yang berkontribusi secara signifikan pada kluster ini. Kluster kedua diwakili oleh bandara CGK, SUB dan DPS. Kluster ketiga diwakili oleh BPN, kluster keempat diwakili oleh UPG dan MDC, kluster kelima diwakili

oleh bandara KOE dan kluster yang terakhir diwakili oleh bandara AMQ, TIM, dan DJJ. Metrik yang terakhir yaitu *graph density* menyatakan rata-rata kepadatan jaringan tersebut sebesar 0,038. Metrik lain seperti *average weighted degree* (baik jumlah penerbangan dan penumpang) tidak ditampilkan pada Tabel 1. Hal ini sesuai dengan asumsi yang digunakan dalam memodelkan topologi jaringan yaitu arah rutanya diasumsikan *undirected*. Selain itu, data jumlah penumpang pada masing-masing rute tidak terdapat pada PM 88 Tahun 2013 karena PM 88 ini hanya mengatur rute-rute yang ada di Indonesia. Hasil visualisasi topologi jaringan penerbangan domestik di Indonesia beserta klusternya ditampilkan pada Gambar 4.

Lebih jauh lagi, bandara-bandara yang berkontribusi secara signifikan terhadap jaringan juga diperoleh melalui analisis topologi jaringan. Empat metrik digunakan untuk mengkuantifikasi peran-peran bandara dalam jaringan penerbangan domestik berjadwal ini. Metrik pertama adalah *degree of centrality*. Metrik ini merepresentasikan jumlah rute yang masuk dan keluar dari suatu bandara. Semakin tinggi *degree*-nya maka peran bandara tersebut sebagai *hub* semakin tinggi juga. 5 bandara dengan peran tertinggi ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. 5 bandara dengan nilai *degree of centrality* tertinggi

Kode IATA	Kota	Degree
CKG	Jakarta	49
SUB	Surabaya	49
UPG	Makassar	48
AMQ	Ambon	40
MDC	Balikpapan	37

Sumber: Diolah

Metrik berikutnya yang digunakan untuk mengukur peran bandara dalam jaringan adalah *eigenvector centrality*. Metrik ini merupakan turunan dari *degree of centrality* namun mengukur seberapa banyak koneksi suatu bandara dengan bandara-bandara lain yang memiliki *degree of centrality* yang tinggi. Semakin tinggi *eigenvector centrality*-nya semakin baik koneksi bandara tersebut dengan bandara-bandara hub. 5 bandara dengan nilai *eigenvector centrality* tertinggi ditampilkan pada Tabel 3.

Metrik *betweenness centrality* mengukur seberapa penting peran bandara sebagai *gatekeeper* dalam suatu jaringan. Bandara

sebagai *gatekeeper* atau penghubung memegang peran yang sangat penting dalam suatu kluster dalam sebuah jaringan. Tidak beroperasinya bandara dengan peran sebagai *gatekeeper* akan membuat jaringan dalam kluster tersebut terhambat. Sebagai contoh, untuk jaringan penerbangan di Indonesia berdasarkan PM 88 tahun 2013, peran bandara KOE sangat terlihat sebagai *gatekeeper* untuk kluster 5.

Tabel 3. 5 bandara dengan nilai *eigenvector centrality* tertinggi

Kode IATA	Kota	EC
SUB	Surabaya	1,000
CGK	Jakarta	0,981
UPG	Makassar	0,908
DPS	Denpasar	0,742
BPN	Balikpapan	0,717

Sumber: Diolah

Apabila bandara KOE tidak dapat beroperasi maka bandara-bandara kecil lainnya yang berada di sekitarnya akan terputus dengan jaringan penerbangan nasional, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Namun pada skala nasional, bandara KOE menduduki peringkat ke 11 dengan peran sebagai *gatekeeper*. Berdasarkan hasil analisis topologinya, 5 bandara di Indonesia dengan nilai *betweenness centrality* (peran sebagai *gatekeeper*) tertinggi ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. 5 bandara dengan nilai *betweenness centrality* tertinggi

Kode IATA	Kota	BC
CGK	Jakarta	3344
SUB	Surabaya	2727
UPG	Makassar	2635
AMQ	Ambon	2362
KNO	Medan	1841

Sumber: Diolah

Metrik terakhir yang digunakan untuk mengukur peran bandara dalam suatu jaringan adalah *page rank*. Nilai *page rank* mengindikasikan seberapa banyak bandara yang terkoneksi dengan suatu bandar.

Tabel 5. 5 bandara dengan nilai *page rank* tertinggi

Kode IATA	Kota	PR
CGK	Jakarta	0,03
SUB	Surabaya	0,03
UPG	Makassar	0,03
AMQ	Ambon	0,03
MDC	Manado	0,02

Sumber: Diolah

Suatu bandara dengan nilai *page rank* yang tinggi artinya ada banyak bandara yang merujuk/terkoneksi dengan bandara tersebut. Jumlah yang terkoneksi dalam hal ini tidak merujuk kepada seberapa sering namun seberapa banyak bandara berbeda (*unique airport*) terkoneksi dengan suatu bandara. Tabel 5 menampilkan 5 bandara di Indonesia dengan *page rank* tertinggi.

KESIMPULAN

Rute dan jaringan penerbangan di Indonesia diatur melalui PM 88 Tahun 2013. Berdasarkan data rute domestik berjadwal pada peraturan ini, topologinya dibangun dan dianalisis. Analisis topologi jaringan dilakukan untuk melihat jaringan penerbangan sebagai satu sistem yang terintegrasi dan juga melihat peran-peran bandara yang secara signifikan berpengaruh terhadap jaringan. Berdasarkan analisis jaringan diperoleh bahwa jaringan domestik berjadwal mengikuti *Power-Law distribution* sebagaimana jaringan-jaringan lain yang terbentuk secara alamiah. Pada jaringan domestik berjadwal juga diperoleh bahwa satu bandara terkoneksi rata-rata dengan 7 bandara lainnya (3,8 % dari total koneksi yang ada). Selain itu, di dalam jaringan yang dianalisis diperoleh jarak terjauh dapat dijangkau melalui 6 kali penerbangan dan rata-rata koneksi antar bandara dapat ditempuh dengan 3 kali penerbangan. Melalui analisis topologi, diperoleh juga bahwa jaringan penerbangan domestik terbagi menjadi 6 kluster. Dari sisi peran bandara, diperoleh bandara seperti CGK, SUB, UPG, AMQ, MDC, DPS, BPN, dan KNO memiliki peran-peran yang penting dan yang berkontribusi secara signifikan terhadap karakteristik jaringan penerbangan domestik.

SARAN

Pada penelitian ini telah dikaji analisis jaringan penerbangan domestik dari sisi topologinya berdasarkan PM 88 Tahun 2013. Pada kajian berikutnya disarankan agar dilakukan evaluasi antara yang direncanakan dengan realisasi yang terjadi di lapangan

sehingga akan diperoleh sejauh mana perencanaan yang telah diimplementasikan sesuai dengan PM 88 Tahun 2013 ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan salah satu luaran dari kajian rute dan jaringan yang dikerjakan oleh tim dari Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung selama periode Maret-Oktober 2021 yang didanai oleh Kementerian Perhubungan di bawah koordinasi Pusat Penelitian dan Pengembangan Transportasi Udara.

DAFTAR PUSTAKA

- Albert, R., & Barabasi, A. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*.
- Bagler, G. (2008). Analysis of the airport network of India as a complex weighted network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 387, (pp. 2972-2980).
- Cheung, D., & Gunes, M. (2012). A complex network analysis of the United States air transportation. *IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*, (pp. 699-701).
- Couto, G., Silva, A., Ruiz, L., & Benevenuto, F. (2015). Structural properties of the Brazilian air transportation network. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, (pp. 1655-1674).
- Guida, M., & Maria, F. (2007). Topology of the Italian airport network: A scale-free small-world network with fractal structure. *Chaos, Solitons & Fractals* 31 (3), (pp. 527-536).
- Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. New York: Oxford University Press.
- Siozos-Rousoulis, L., Robert, D., & Verbeke, W. (2021). A study of the US domestic air transportation network: temporal evolution of network topology and robustness from 2001 to 2016. *Journal of Transportation Security*, 55-78.

Sun, X., Gollnick, V., & Wandelt, S. (2017). Robustness analysis metrics for worldwide airport network: A comprehensive study. *Chinese Journal of Aeronautics*, 500-5012

