

## Perhitungan Emisi Gas Pesawat Udara pada Fase *Taxi-Out* dengan Operasi Satu Mesin Mati di Bandar Udara Soekarno-Hatta

### *An Analysis of Aircraft Gas Emission during Taxi-Out Operation with Single Engine Operation at Soekarno-Hatta International Airport*

Minda Mora<sup>1)</sup>\* dan Susanti<sup>2)</sup>

<sup>1, 2)</sup>Puslitbang Transportasi Udara, Jl. Merdeka Timur No.5, Jakarta Pusat, 10110

[mindamora25@gmail.com](mailto:mindamora25@gmail.com)<sup>1)</sup>, [shanti.udara@gmail.com](mailto:shanti.udara@gmail.com)<sup>2)</sup>

---

#### INFO ARTIKEL

##### Histori Artikel:

Diterima: 3 November 2020

Direvisi: 5 Desember 2020

Disetujui: 6 Desember 2020

Dipublikasi online: Desember 2020

##### Keywords:

Aviation; aircraft emission; taxi-out; single-engine taxiing

##### Kata kunci:

Penerbangan; emisi pesawat udara; taxi-out; single-engine taxiing

##### Permalink/DOI:

<https://dx.doi.org/10.25104/wa.v46i2.389.110-121>

©2020 Puslitbang Transportasi Udara, Badanlitbang Perhubungan-Kementerian Perhubungan RI. This is an open access article under the CC BY-NCSA license

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

---

#### ABSTRACT / ABSTRAK

*Aircraft emits gas emission in every phase of flight, especially in the taxi-out phase. This paper is aimed at calculating aircraft gas emissions during taxi-out using the actual daily of aircraft operational data at Soekarno-Hatta Airport and evaluating the potential reduction of aircraft gas emission if the taxi-out phase is carried out with single engine taxiing strategy. Aircraft gas emissions are calculated using the hybrid method based on the formula referenced in the International Civil Aviation Organization Airport Air Quality Manual. The emission calculation is done for all domestic, international and freight flights at Soekarno-Hatta International Airport on January until July for the year 2009. Result showed that single-engine taxiing provided significant gas emission reductions for 37% to 40%.*

Pesawat udara mengeluarkan emisi gas di setiap fase penerbangan, khususnya pada fase *taxi-out*. Makalah ini bertujuan untuk menghitung emisi gas pesawat udara pada saat *taxi-out* dengan menggunakan data operasional harian aktual pesawat udara di Bandar Udara Soekarno-Hatta dan melakukan evaluasi potensi pengurangan emisi apabila fase *taxi-out* dilakukan dengan strategi operasi satu mesin pesawat udara mati. Emisi gas pesawat udara dihitung dengan menggunakan metode *hybrid* berdasarkan formula yang direferensikan dalam *International Civil Aviation Organization Airport Air Quality Manual*. Perhitungan emisi gas pesawat udara dilakukan pada setiap penerbangan domestik, internasional dan kargo di Bandar Udara Internasional Soekarno-Hatta pada bulan Januari sampai dengan Juli tahun 2019. Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi dengan operasi satu mesin mati memberikan potensi pengurangan emisi gas pesawat udara sebesar 37% s.d 40%.

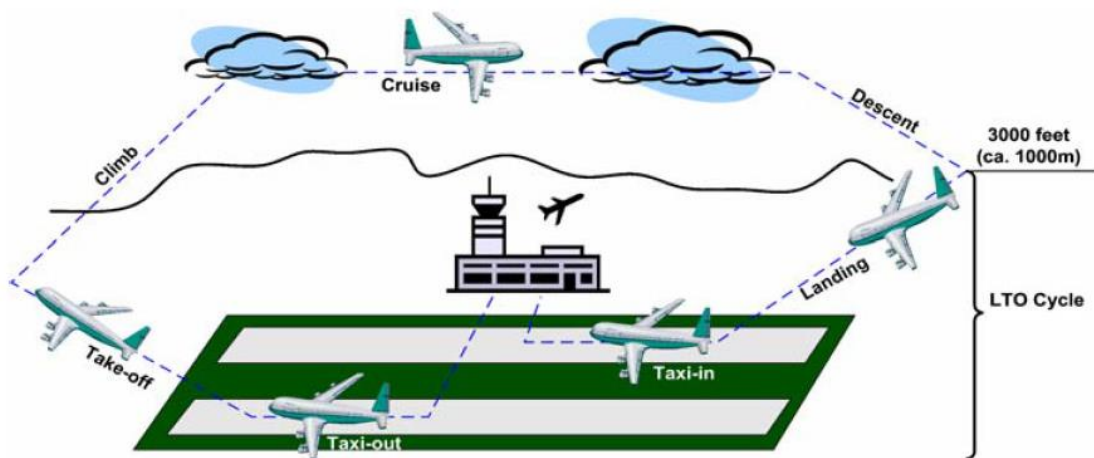
## PENDAHULUAN

Transportasi udara merupakan sumber emisi yang berdampak signifikan pada kualitas udara lokal dan iklim global (Miller et al., 2000). Penerbangan sipil menyumbang emisi CO<sub>2</sub> dari bahan bakar fosil sebesar 2,4% pada tahun 2018 dan meningkat 32% dalam kurun waktu lima tahun terakhir, dimana laju pertumbuhan emisi ini 70% lebih tinggi dari yang diasumsikan dalam proyeksi ICAO (Graver et al., 2019). Penerbangan internasional sendiri bertanggung jawab atas 543 juta ton emisi CO<sub>2</sub> pada tahun 2018 (Crippa et al., 2019). ICAO memprediksikan emisi CO<sub>2</sub> dari penerbangan internasional akan meningkat tiga kali lipat pada tahun 2050 apabila tren saat ini bertahan (ICAO, 2019).

Pesawat udara mengeluarkan emisi gas buang di setiap fase penerbangan, mulai dari *taxi-out*, lepas landas (*take-off*), menanjak (*climbing*), terbang jelajah (*cruise*), menurun (*descent*) sampai dengan mendarat (*landing*). Emisi gas buang dari pembakaran mesin pesawat udara terdiri dari karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), uap air (H<sub>2</sub>O), ozon (O<sub>3</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) dan metana (CH<sub>4</sub>). Selain itu pesawat udara juga menghasilkan karbon monoksida (CO), sulfur oksida (SO<sub>x</sub>) dan jelaga (Norton, 2014). Emisi gas buang yang dihasilkan oleh pesawat udara pada saat terbang jelajah (*cruise*) dapat memberikan

dampak radiasi dan penipisan ozon. Polutan seperti CO<sub>2</sub> berdampak langsung terhadap pemanasan di atmosfer. Sedangkan NO<sub>x</sub> menyebabkan terbentuknya ozon pada tempat yang tidak diinginkan yaitu pada ketinggian rendah (ketinggian kurang dari 15 km atau lebih). Ozon pada ketinggian lebih dari 15 km mengurangi pemanasan global sedangkan pada ketinggian rendah, terbentuknya ozon akan meningkatkan pemanasan global, dimana pesawat jet komersial biasanya terbang pada ketinggian ini (sekitar 12 km) (Barrett, 2004).

Pada saat pengoperasian di darat (*taxi-in* dan *taxi-out*), pesawat udara juga memberikan kontribusi yang signifikan terhadap emisi di bandar udara (Deonandan & Balakrishnan, 2010). Emisi yang dihasilkan oleh pesawat udara seperti CO dan NO<sub>x</sub> akan mempengaruhi kualitas udara lokal di bandar udara. Polutan CO dan NO<sub>x</sub> di udara merupakan unsur pembentukan salah satu senyawa beracun yaitu *tropospheric ozone* (Miller et al., 2000). Selain itu, NO<sub>x</sub> pada udara merupakan unsur utama dalam pembentukan kabut asap dan hujan asam (*acid rain*) yang dapat memperburuk kondisi pernapasan bagi penderita asma. Selanjutnya, konsentrasi karbon monoksida (CO) yang melebihi ambang batas dapat menyebabkan keracunan dan kematian.

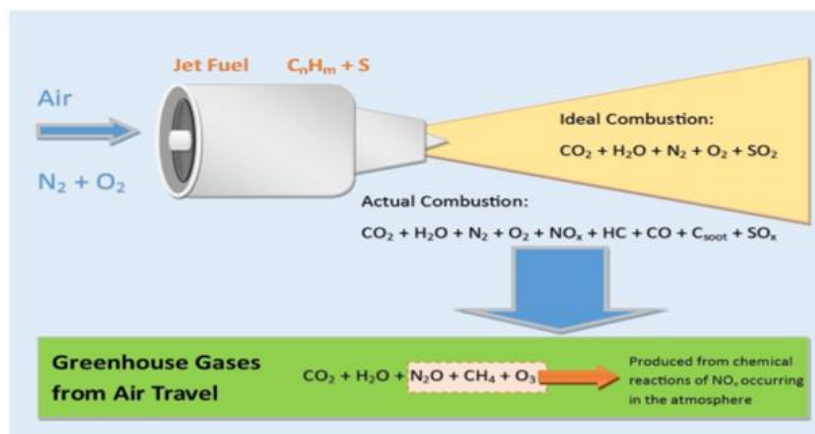


Gambar 1. Fase penerbangan pesawat udara (Pejovic et al., 2008)

Bandar Udara Soekarno-Hatta merupakan bandar udara terpadat di Indonesia. Tingginya jumlah penerbangan dan terbatasnya kapasitas bandar udara mengakibatkan meningkatnya kepadatan di area terminal terutama pada jam sibuk. Kondisi tersebut menyebabkan pesawat udara harus mengantri ketika proses *taxi-out*. Rata-rata 30% dari total jumlah penerbangan di Bandar Udara Soekarno-Hatta pada bulan Juli, Agustus dan September 2014 mengalami keterlambatan keberangkatan karena terjadinya kepadatan lalu lintas pesawat udara pada saat *taxi-out* (Mora & Yusman, 2014).

Waktu *taxi-out* adalah waktu yang dibutuhkan pesawat udara mulai dari *pushback* dari *gate* sampai dengan sesaat setelah lepas landas (*wheel-off*). Semakin lama waktu *taxi-out*, maka emisi yang dihasilkan pesawat udara juga semakin besar

karena mesin pesawat udara tetap menyala selama dalam proses tersebut. Sampai saat ini belum ada penelitian yang melakukan evaluasi terhadap tingkat emisi gas buang pesawat udara di Indonesia terutama pada saat *taxi-out* di bandar udara dan strategi yang dapat diterapkan untuk mengurangi emisi yang dihasilkan. Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan emisi pesawat udara aktual pada saat proses *taxi-out* di Bandar Udara Soekarno-Hatta untuk tiga polutan, yaitu CO, NO<sub>x</sub> dan HC dan melakukan evaluasi potensi pengurangan emisi dengan membandingkan emisi aktual dengan emisi yang dihasilkan melalui strategi *single-engine taxiing*. Perhitungan emisi dilakukan dengan menggunakan data aktual operasional pesawat udara di Bandar Udara Soekarno-Hatta pada bulan Januari sampai dengan Juli tahun 2019 untuk semua penerbangan baik domestik, internasional dan kargo.



Gambar 2. Polutan dari pembakaran mesin pesawat udara (Norton, 2014)

## TINJAUAN PUSTAKA

Upaya penurunan emisi gas buang pesawat udara pada saat *taxi-in* dan *taxi-out* di bandar udara telah menjadi perhatian sejak lama. Beberapa penelitian telah dilakukan terutama pada kasus bandar udara yang sibuk. Pada tahun 1978 (California Air Resources, 1978), menemukan sembilan strategi potensial untuk menurunkan tingkat emisi gas buang pesawat udara di Los Angeles International Airport dan San Francisco International Airport. Hasil penelitian menyatakan dengan mengurangi jumlah

mesin yang beroperasi pada saat *taxi-in* dan *taxi-out* dapat mengurangi emisi secara signifikan (California Air Resources, 1978). Penelitian lanjutan dilakukan oleh (Gelinas & Fan, 1979) dengan mempertimbangkan aspek keselamatan pada setiap strategi. Selanjutnya pada tahun 2010 (Deonandan & Balakrishnan, 2010) melakukan evaluasi strategi penurunan emisi pesawat udara pada saat *taxi-out* di 20 bandar udara besar di Amerika Serikat.

## Emisi Gas Buang Mesin Pesawat Udara

Mesin pesawat udara merupakan hal utama yang menjadi perhatian oleh pihak-pihak yang sangat peduli terhadap emisi penerbangan karena mesin pesawat udara dapat menjadi sumber emisi gas buang dominan di bandar udara. Mesin pesawat udara, pada umumnya dapat dibagi dua, yaitu mesin utama (*main engine*) yang berfungsi untuk memberikan gaya dorong (*thrust*) ke depan dan APUs (*Auxiliary Power Units*) yang menyediakan tenaga listrik dan udara pneumatic ketika pesawat udara parkir di *gate*. Mesin utama umumnya dapat diklasifikasikan sebagai turbojet dan mesin turboprop dengan menggunakan bahan bakar aviation kerosene (jet fuel) atau mesin piston yang menggunakan bahan bakar aviation gasoline.

Emisi gas buang dari setiap mesin pesawat udara merupakan fungsi dari tiga parameter, yaitu *Time In-Mode* (TIM), indeks emisi mesin (*Emission Index*, EI), dan aliran bahan bakar mesin utama. *Time-in-Mode* (TIM) adalah periode waktu, biasanya diukur dalam hitungan menit, dimana mesin pesawat menghabiskan daya pada saat siklus operasi penerbangan. Sedangkan *Emission Index* (EI) didefinisikan sebagai massa polutan yang dipancarkan per satuan massa bahan bakar yang dibakar untuk mesin tertentu. *The ICAO Engine Emission Data Bank* (EEDB) menyediakan data EI untuk tipe mesin dalam satuan gram polutan per kilogram bahan bakar (g/kg) untuk NO<sub>x</sub>, CO dan HC, serta aliran bahan bakar di fase tertentu dalam satuan kilogram per detik (kg/s).

Selain TIM dan EI, besaran emisi yang dihasilkan dari pengoperasian pesawat udara di bandar udara juga dipengaruhi oleh dua parameter tambahan, yaitu ukuran dan tipe pesawat udara serta jumlah penerbangan yang beroperasi di bandar udara. Dalam perhitungan emisi gas buang mesin pesawat udara di bandar udara tertentu, metode dan pendekatan yang digunakan sangat berpengaruh dalam menghasilkan perhitungan dengan tingkat akurasi yang tinggi.

## **Pendekatan Perhitungan Emisi Gas Buang Mesin Pesawat Udara**

Terdapat beberapa pendekatan atau metodologi yang dapat digunakan untuk menghitung emisi pesawat udara. Masing-masing pendekatan memiliki tingkat akurasi dan kompleksitas yang berbeda. Selain itu, setiap pendekatan dapat menggabungkan berbagai pilihan untuk parameter tertentu dan faktor yang berpengaruh, tergantung pada ketersediaan data dan informasi. Di bawah ini akan dijelaskan 3 (tiga) pendekatan untuk menghitung emisi gas buang pesawat udara [Airport Air Quality Manual (Doc. 9889)-ICAO].

### ***The Simple Approach* (pendekatan sederhana)**

Metode perhitungan emisi gas buang pesawat udara yang paling mudah. Metode ini hanya membutuhkan data dan informasi umum yang telah tersedia dan mudah didapatkan. Selain itu, pendekatan ini tidak membutuhkan informasi spesifik bandar udara. Namun, perhitungan emisi gas buang pesawat udara dengan metode ini, memberikan tingkat kesalahan dan ketidakpastian yang paling besar. Data spesifik yang dibutuhkan adalah jumlah pergerakan pesawat udara (selama periode tertentu seperti satu tahun) dan jenis pesawat udara yang terlibat dalam setiap gerakan atau beberapa informasi dasar tambahan seperti mesin yang digunakan untuk setiap jenis pesawat udara. Pendekatan sederhana harus digunakan hanya sebagai sarana melakukan penilaian awal dalam penghitungan emisi mesin pesawat udara di bandar udara. Pada umumnya, pendekatan ini bersifat konservatif dan memberikan hasil perhitungan emisi pesawat udara yang jauh lebih besar dibandingkan kondisi sebenarnya. Namun, untuk beberapa jenis polutan dan jenis pesawat udara yang kurang umum, emisi yang dihasilkan dapat terlalu kecil dibandingkan kondisi sebenarnya. Dengan demikian, tingkat keakuratan pendekatan sederhana ini tidak terlalu jelas untuk melakukan penghitungan emisi gas buang mesin pesawat udara yang sebenarnya di bandara tertentu.

### ***The Advanced Approach (Pendekatan canggih)***

Metode penghitungan emisi gas buang dengan pendekatan ini menggunakan data dan informasi yang lebih spesifik dibandingkan dengan pendekatan sederhana. Data dan informasi yang digunakan adalah tipe pesawat udara, tipe mesin, perhitungan EI dan *Time in Mode* (TIM/waktu yang dibutuhkan untuk melakukan fase tertentu dalam penerbangan). Pendekatan ini memerlukan informasi khusus bandar udara terkait atau menggunakan asumsi umum yang tersedia. Pendekatan ini mencerminkan kondisi lokal dalam menggabungkan beberapa perhitungan prestasi pesawat udara (*aircraft performance*). Hasil perhitungan emisi gas buang mesin pesawat udara dengan menggunakan metode ini lebih akurat dibandingkan pendekatan sederhana, namun hasil perhitungan total emisi masih dianggap konservatif.

### ***The Sophisticated Approach (pendekatan mutakhir)***

Perhitungan emisi gas buang pesawat udara dengan menggunakan pendekatan ini menghasilkan/mencerminkan emisi gas buang pesawat yang sebenarnya. Pendekatan ini merupakan metode yang paling komprehensif yang membutuhkan data dan informasi yang sangat banyak dengan tingkat kepastian hasil yang sangat tinggi. Data dan informasi yang dibutuhkan adalah data prestasi mesin/pesawat udara yang sebenarnya. Penggunaan pendekatan ini

memerlukan pengetahuan yang luas tentang pengoperasian mesin dan pesawat udara dan dalam kasus tertentu akan memerlukan data atau model yang biasanya tidak tersedia dalam domain publik dan dalam kebanyakan kasus mengharuskan pengguna untuk melakukan tingkat analisis yang lebih tinggi.

Pemilihan metode (pendekatan) yang digunakan dalam menghitung emisi gas pesawat udara dilakukan sesuai dengan ketersediaan data dan informasi serta tingkat keakuratan yang diinginkan. Gabungan dari 2 metode (*hybrid approach*) dapat dilakukan karena elemen data yang dibutuhkan tidak tergantung satu sama lain (ICAO, 2011).

## **METODOLOGI**

### **Emisi Aktual**

Dalam penelitian ini, perhitungan emisi difokuskan pada 3 (tiga) polutan yaitu CO, NO<sub>x</sub>, dan HC dengan menggunakan data aktual operasional pesawat udara di Bandar Udara Soekarno-Hatta pada bulan Januari sampai dengan Juli tahun 2019 untuk semua penerbangan baik domestik, internasional, dan kargo. Perhitungan menggunakan pendekatan hibrid (*hybrid approach*) (ICAO, 2011). Pendekatan hibrid yang digunakan dalam penelitian ini merupakan gabungan dari *the advanced approach* dan *the sophisticated approach*. Parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung emisi gas buang pesawat udara dengan menggunakan pendekatan hibrid adalah sebagai berikut.

Tabel 1 Parameter penghitungan emisi gas buang pesawat udara dengan menggunakan pendekatan hibrid

No	Parameter	Pendekatan Hibrid
1.	Armada (kombinasi pesawat udara dan mesin pesawat udara)	Menggunakan data aktual tipe pesawat udara dan mesin pesawat udara yang beroperasi berdasarkan nomor registrasi pesawat udara
2.	Pergerakan	Jumlah pergerakan pesawat udara berdasarkan registrasi pesawat udara
3.	<i>Time in Mode</i> (TIM)	Waktu pergerakan aktual pesawat udara
4.	<i>Fuel Flow</i>	Data aliran bahan bakar diambil dari <i>ICAO Emission Engine Database</i>
5.	<i>Emission Index</i> (EI)	Data indeks emisi mesin diambil dari <i>ICAO Emission Engine Database</i>

Sumber: *Airport Air Quality Manual (Doc. 9889)-ICAO*

Besaran emisi gas buang yang dihasilkan dalam setiap penerbangan dihitung berdasarkan waktu aktual penerbangan (*actual mission time*) dan tipe pesawat udara dengan menggunakan rumusan sebagai berikut (ICAO, 2011).

$$E_{ij} = TIM_i \times FF_{coefficient} \times EI_{ij} \times N_i \quad (1)$$

dimana  $E_{ij}$  adalah besar emisi polutan  $j$  pada setiap penerbangan  $i$  dalam satuan gram,  $TIM_{ij}$  adalah waktu yang dibutuhkan dalam setiap penerbangan  $i$ ,  $FF_{coefficient}$  adalah data aliran bahan bakar dalam kg/s,  $EI_{ij}$  adalah indek emisi polutan  $j$  pada setiap penerbangan  $i$  dalam g/kg bahan bakar, dan  $N_i$  adalah jumlah mesin.

Data *time in mode* (TIM) (waktu aktual setiap penerbangan), pergerakan pesawat udara dan tipe pesawat udara yang beroperasi di Bandar Udara Soekarno Hatta diperoleh dari pengelola lalu lintas udara Airnav Indonesia cabang Jakarta *Air Traffic Services Center* (JATSC). Data *specific fuel burn coefficient* dan *emission index* merupakan data yang terkait dengan jenis pesawat udara serta tipe mesin yang digunakan. Setiap pesawat udara memiliki nomor registrasi negara yang terdapat di bagian ekor pesawat udara (*aircraft tail number*). Nomor registrasi negara tersebut bersifat unik untuk setiap pesawat udara. Berdasarkan informasi nomor registrasi negara, didapatkan data tipe mesin pesawat udara untuk setiap pesawat udara yang diperoleh di *planespotter.net*. Selanjutnya data *specific fuel burn coefficient* dan *emission index* untuk setiap tipe mesin pesawat udara diperoleh dari ICAO (*International Civil Aviation Organization*) *Engine Emission Database*.

### Single – Engine Taxiing

Emisi pesawat udara berpotensi berkurang jika semua pesawat mematikan satu dari mesin pesawat pada saat melakukan *taxi-out*. Apabila pesawat bermesin ganda, maka ketika *taxi-out* hanya menggunakan satu mesin. Namun, semua mesin pesawat udara harus dipanaskan 2-5 menit sebelum

lepas landas (*take-off*). Dalam penelitian ini, semua mesin pesawat diasumsikan harus dipanaskan selama 5 menit (300detik). Sehingga, jika waktu *taxi-out* di bandar udara kurang dari 5 menit, maka skenario satu mesin mati tidak mengubah jumlah emisi yang dihasilkan. Sebaliknya, jika fase *taxi-out* lebih dari 5 menit, maka jumlah emisi berkurang sejumlah polutan yang dihasilkan dari satu mesin selama selisih waktu *taxi-out* tersebut.

Setelah semua mesin dipanaskan, kemudian satu mesin dimatikan, sehingga pada saat *taxi-out*, diasumsikan bahwa semua mesin harus dipanaskan selama 5 menit sebelum lepas landas.

Berdasarkan informasi tersebut di atas, maka emisi dari penerbangan  $i$  untuk setiap polutan  $j$  ( $E_{ij}$  dalam kg) untuk *single – engine taxiing* adalah sebagai berikut (Deonandan & Balakrishnan, 2010).

$$E_{ij} = ([TIM_{ij} \times (N_i - 1)] \min\{TIM_{ij}, 300\}) \times FF_{coefficient} \times EI_{ij} \quad (2)$$

$TIM_{ij}$  adalah waktu yang dibutuhkan dalam setiap penerbangan  $i$ ,  $FF_{coefficient}$  adalah data aliran bahan bakar dalam kg/s,  $EI_{ij}$  adalah indek emisi polutan  $j$  pada setiap penerbangan  $i$  dalam g/kg bahan bakar, dan  $N_i$  adalah jumlah mesin. Potensial pengurangan emisi dilakukan dengan membandingkan antara emisi yang dihasilkan pada kondisi operasional pesawat pada kondisi aktual dengan *single-engine taxiing*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

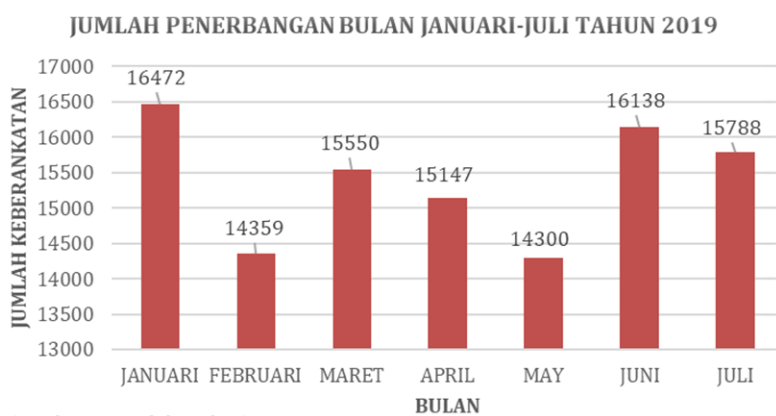
Hasil pengumpulan data operasional aktual harian di Bandar Udara Soekarno-Hatta pada bulan Januari s.d Juli 2019 merupakan data harian yang meliputi data nomor registrasi pesawat udara, tipe pesawat udara, waktu aktual *pushback* pesawat udara (waktu yang menunjukkan pesawat udara keluar dari *gate*) setiap penerbangan, dan waktu *Actual Time Departure* (ATD) (waktu yang menunjukkan saat pesawat udara lepas landas).

### Jumlah Keberangkatan

Gambar 3 menunjukkan Jumlah keberangkatan di Bandar Udara Soekarno-Hatta pada periode bulan Januari s.d Juli 2019 untuk semua penerbangan, domestik, intenasional dan kargo. Jumlah keberangkatan terbesar adalah pada bulan Januari dengan 16.472 keberangkatan perbulan, diikuti bulan Juni dengan 16.138 keberangkatan dan bulan Juli dengan 15.788 keberangkatan. Jumlah keberangkatan paling sedikit adalah pada bulan Mei dengan 14.300 keberangkatan.

### Tipe Pesawat Udara dan Mesin

Berdasarkan data nomor registrasi pesawat dan tipe pesawat, diperoleh data jenis mesin pesawat udara pada setiap penerbangan. Jenis mesin didapatkan dari portal planespotter.net dengan memasukkan data nomor registrasi pesawat udara. Hasil pengolahan data menemukan 30 tipe pesawat udara dan 26 tipe mesin yang beroperasi di Bandar Udara Soekarno-Hatta. Tipe pesawat serta jenis mesin yang digunakan pada penerbangan di Bandar Udara Soekarno-Hatta pada bulan Januari s.d Juli 2019 dapat dilihat pada Tabel 2.



(sumber: pengolahan data)

Gambar 3. Jumlah keberangkatan bulan Januari s.d Juli 2019

Tabel 2. Tipe pesawat, jenis dan jumlah mesin yang beroperasi pada bulan Januari s.d Juli 2019

TIPE PESAWAT	JENIS MESIN	JUMLAH MESIN
Airbus A319-100	IAE V2524-A5/CFMI CFM56-5B6/2P	2
Airbus A320-200	CFM56-5B6/3	2
Airbus A330-200	RR Trent 772B-60	2
Airbus A320neo	CFMI LEAP-1A26	2
Airbus A321neo	PW1133G/CFMI LEAP-1A33	2
Airbus A321-200	CFMI LEAP-1A32	2
Airbus A330-300	RR Trent 772B-60	2
Airbus A330-900	RR Trent 7000-72	2
Airbus A350-900	RR Trent XWB-84	2
Airbus A350-100	RR Trent XWB-97	2
ATR 42-500	PWC PW127E	2
ATR 72-600	PWC PW127M	2
Boeing 737-900ER	CFMI CFM56-7B26	2
Boeing 737-8 MAX	CFMI LEAP-1B	2
Boeing 737-300	CFMI CFM56-3C1	2
Boeing 737-400	CFMI CFM56-3C1	2
Boeing 737-500	CFMI CFM56-3B1	2

TIPE PESAWAT	JENIS MESIN	JUMLAH MESIN
Boeing 737-800	CFMI CFM56-7B24E	2
Boeing 747-400	GE CF6-80C2B1F	4
Boeing 757-200	PW PW2037	2
Boeing 767-300	PW PW4062	2
Boeing 767-200	GE CF6-80A	2
Boeing 747-200	PW JT9D-7Q	4
Boeing 777-200	GE GE90-94B	2
Boeing 777-300	RR Trent 892	2
Boeing 787-8 dreamliner	RR Trent 1000	2
Bombardier CRJ-1000ER	GE CF34-8C5A2	2
Mc Donnell Douglas MD-80	PW JT8D-219	2
Mc Donnell Douglas MD-82	PW JT8D-219	2
Mc Donnell Douglas MD-83	PW JT8D-219	2

Sumber: hasil pengolahan data

Tabel 3. Fuel Flow Coefficient dan Emission Index

NO	JENIS MESIN	FUEL FLOW COEFFICIENT (kg/s)	EMISSION INDEX (g/kg)		
			HC	CO	NOx
1	RR Trent XWB-97	0.325	0.89	19.09	4.81
2	RR Trent XWB-84	0.291	1.03	21.46	4.41
3	RR Trent 772B-60	0.28	1.46	17.94	4.71
4	RR Trent 7000-72	0.241		6.45	6.1
5	RR Trent 892	0.3	0.7	13.07	5.33
6	PWC PW127M	0.0897	0.11	21.47	6.55
7	PWC PW127E	0.0897	0.11	21.47	6.55
8	PW1133G/CFMI LEAP-1A33	0.0988	0.26	24.06	5.31
9	PW PW4062	0.21	10.86	42.61	3.78
10	PW PW2037	0.141	2.26	23.1	4.4
11	PW JT9D-7Q	0.237	12	53	3
12	PW JT8D-219	0.1344	3.48	12.63	3.6
13	IAE V2524-A5/CFMI CFM56-5B6/2P	0.133	0.14	12.03	5.18
14	GE GE90-94B	0.296	0.41	12.69	6.09
15	GE CF6-80C2B1F	0.199	1.54	19.23	4.73
16	GE CF6-80A	0.15	6.29	28.2	3.4
17	GE CF34-8C5A2	0.066	0.13	17.3	4.7
18	CFMI LEAP-1B	0.098	0.57	14.62	4.64
19	CFMI LEAP-1A32	0.096	0.22	18.69	4.85
20	CFMI LEAP-1A26	0.088	0.28	21.4	4.63
21	CFMI CFM56-7B26	0.113	1.9	18.8	4.7
22	CFMI CFM56-7B24E	0.103	2.3	34.71	4.09
23	CFMI CFM56-3C1	0.124	1.42	26.8	4.3
24	CFMI CFM56-3B1	0.114	2.28	34.4	3.9



NO	JENIS MESIN	FUEL FLOW COEFFICIENT (kg/s)	EMISSION INDEX (g/kg)		
			HC	CO	NO <sub>x</sub>
25	CFM56-5B6/3	0.095	2.93	38.39	3.94
26	RR Trent 1000	0.237	0.06	8.73	5.4

Sumber: ICAO engine emission databank

### Fuel Flow Coefficient dan Emission Index

Fuel Flow Coefficient dan Emission Index setiap tipe mesin pesawat udara ditentukan dari ICAO (*International Civil Aviation Organization*) Engine Emission Databank.

### Waktu Taxi-Out

Waktu *taxi-out* (WTO) merupakan selisih waktu *pushback* pesawat udara (waktu yang menunjukkan pesawat udara keluar dari *gate*), dan waktu *Actual Time Departure* (ATD) (waktu yang menunjukkan saat pesawat udara lepas landas). WTO aktual dihitung untuk setiap penerbangan kemudian dirata-ratakan dalam waktu sebulan. Waktu *taxi-out*

rata-rata pesawat udara di Bandar Udara Soekarno-Hatta dapat dilihat pada Gambar 5.

Dari Gambar 5 terlihat bahwa WTO rata-rata pesawat udara di Bandar Udara Soekarno-Hatta, dalam kurun waktu Januari s.d Juli berkisar antara 24 s.d 30 menit.

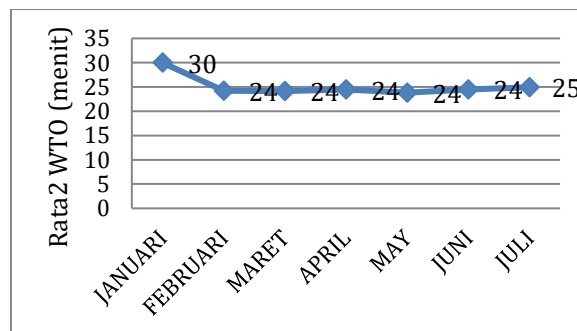
### Analisis Pengurangan Emisi Pesawat Udara

Jumlah emisi yang dihasilkan oleh pesawat udara untuk polutan HC, CO, dan NO<sub>x</sub> dihitung menggunakan persamaan (1) dan (2). Jumlah emisi dihitung untuk setiap penerbangan dengan memperhatikan jenis pesawat udara dan tipe mesin yang beroperasi.

Tabel 4. Perbandingan emisi untuk kondisi aktual dan *single-engine taxiing*

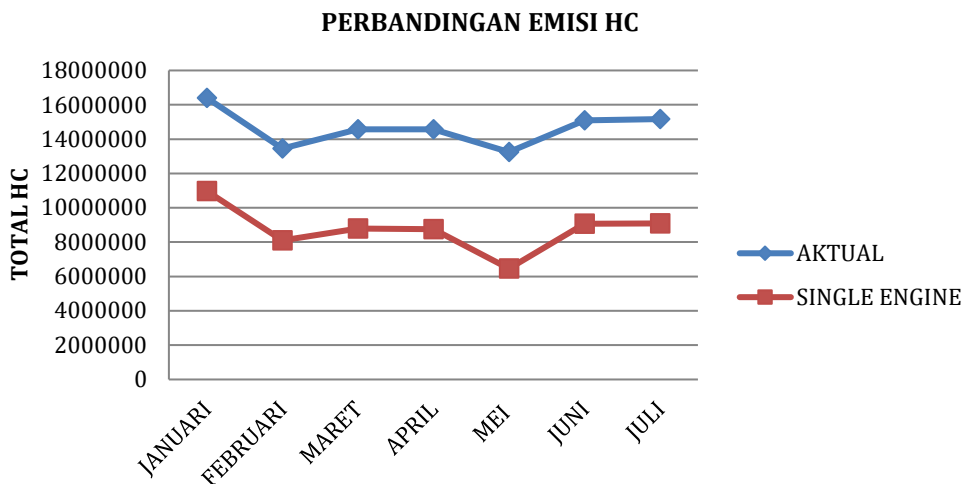
BULAN	POLUTAN					
	HC (GRAM)		CO (GRAM)		NO <sub>x</sub> (GRAM)	
	AKTUAL	SINGLE ENGINE TAXIING	AKTUAL	SINGLE ENGINE TAXIING	AKTUAL	SINGLE ENGINE TAXIING
JANUARI	16406574,24	10979373,44	182263165,4	122669032,3	182263165,4	19723344,83
FEBRUARI	13445478,74	8102662,898	147929677,6	89100060,67	23917344,19	14419625,55
MARET	14572855,5	8795963,784	161056535,2	97164007,55	25667725,65	15141932,29
APRIL	14568788,28	8748619,559	164353690,6	98714403,01	25170996,14	15141932,29
MEI	13248136,95	6458605,35	149996712,1	87785568,85	23192344,28	16627495,02
JUNI	15087384,65	9071201,344	170718387,1	102588701,2	26516438,44	15975598,24
JULI	15174891,38	9088222,209	170052606,2	101898820,2	26716639,74	16024588,52

Sumber: Hasil pengolahan data

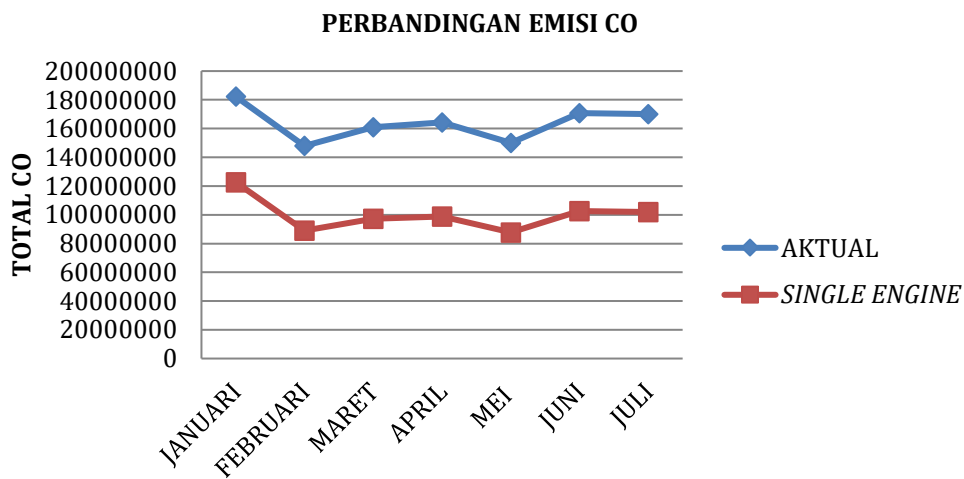


(sumber: pengolahan data)

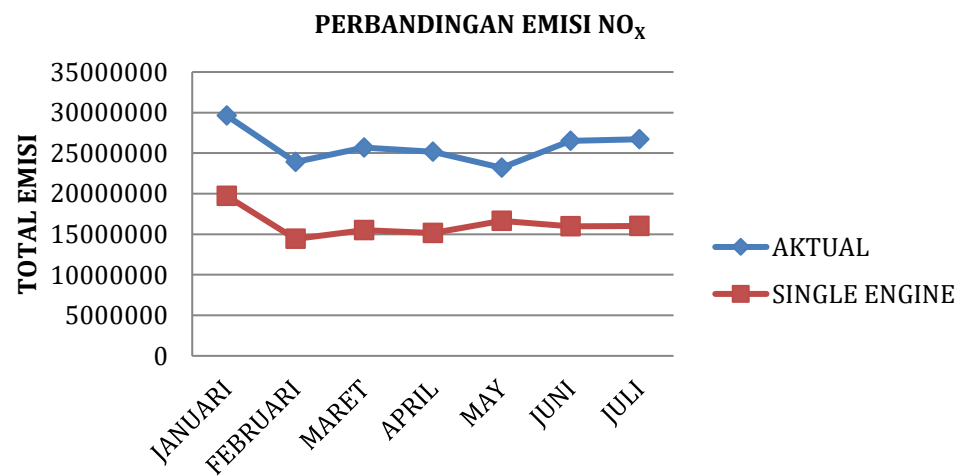
Gambar 4. Waktu *taxi-out* rata-rata



Gambar 5. Perbandingan emisi HC

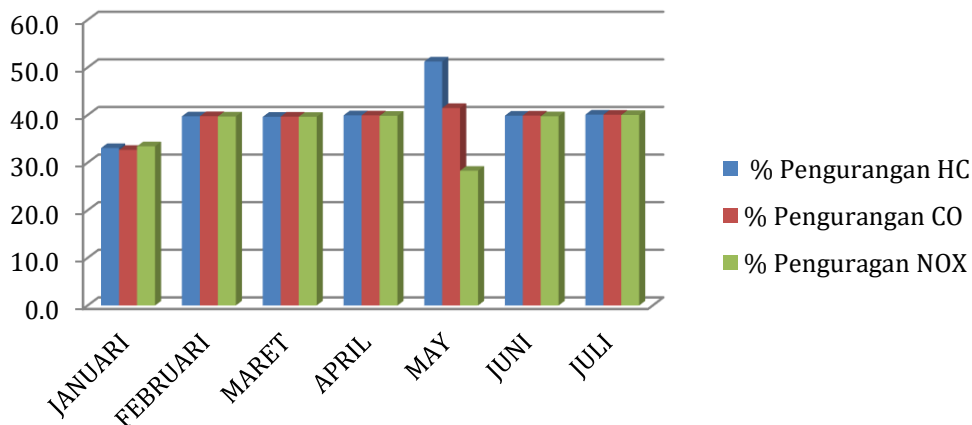


Gambar 6. Perbandingan emisi CO



Gambar 7. Perbandingan emisi NO<sub>x</sub>

## POTENSI PENGURANGAN EMISI



Gambar 8. Potensi pengurangan emisi dengan menggunakan *single-engine taxiing* (dibandingkan dengan kondisi aktual) (sumber: Hasil pengolahan data)

Persentase pengurangan emisi untuk polutan HC, CO, dan NO<sub>x</sub> dengan menggunakan *single-engine taxiing* dibandingkan dengan kondisi aktual dapat dilihat pada Gambar 8. Persentase pengurangan polutan HC dari bulan Januari s.d Juli berkisar 33% s.d 51% dengan rata-rata persentase pengurangan sebesar 40%. Untuk polutan CO, persentase pengurangan berkisar 32% s.d 41%, dengan rata-rata pengurangan sebesar 39%. Sedangkan untuk polutan NO<sub>x</sub>, penggunaan *single-engine taxiing*, berpotensi untuk pengurangan polutan NO<sub>x</sub> berkisar 28% s.d 40%, dengan rata-rata pengurangan sebesar 37%.

### KESIMPULAN

Makalah ini menyajikan hasil penelitian yang bertujuan untuk melakukan evaluasi potensi pengurangan emisi pesawat udara di bandar udara pada saat *taxi-out* dengan menggunakan strategi operasi satu mesin mati (*single engine taxiing*). Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan emisi gas pesawat udara untuk tiga polutan, yaitu HC, CO, NO<sub>x</sub> dan melakukan evaluasi potensi pengurangan emisi dengan membandingkan emisi yang dihasilkan dari fase *taxi-out* pada kondisi operasi yang terjadi di Bandar Udara Soekarno-Hatta (*baseline*) dengan emisi yang dihasilkan melalui strategi dengan operasi

satu mesin mati. Emisi gas pesawat untuk kondisi *baseline* dihitung dengan menggunakan persamaan (1), sedangkan untuk strategi satu mesin mati, menggunakan persamaan (2). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pengoperasian pesawat udara pada saat *taxi-out* dengan menggunakan strategi operasi satu mesin mati memberikan potensi pengurangan emisi pesawat udara 37% s.d 40% tergantung dari jenis polutan.

### SARAN

Metode *single-engine taxiing* yang diterapkan pada perhitungan emisi di Bandar Udara Soekarno-Hatta, berpotensi untuk pengurangan jumlah emisi yang dihasilkan oleh pesawat udara. Metode ini dapat diterapkan di Bandar Udara Soekarno-Hatta. Namun perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengevaluasi kelayakan strategi ini ditinjau dari aspek keselamatan.

Selain itu, perlu dilakukan juga evaluasi terhadap strategi-strategi lain yang memungkinkan diterapkan di bandar udara di Indonesia.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih yang tak terhingga pada rekan-rekan Puslitbang Transportasi Udara yang telah memberikan dukungan semangat

sehingga makalah ini dapat terselesaikan dengan baik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Barrett, M. (2004). *POLLUTION CONTROL STRATEGIES for WWF International*.
- California Air Resources. (1978). *Evaluation of emission control strategies for airfield operation at the los angeles and san francisco international airports*. <https://ww3.arb.ca.gov/research/apr/past/a7-077-30.pdf>
- Crippa, M., Oreggioni, G., D, G., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J. G. ., & Vignati, E. (2019). *Fossil CO2 and GHG emissions of all world countries - 2019 Report Publications Office of the EU*. <https://doi.org/10.2760/687800>
- Deonandan, I., & Balakrishnan, H. (2010). Evaluation of strategies for reducing taxi-out emissions at airports. *10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference 2010, ATIO 2010*, 3, 1-14. <https://doi.org/10.2514/6.2010-9370>
- Gelinas, C. G., & Fan, H. S. L. (1979). Reducing Air Pollutant Emissions at Airports by Controlling Aircraft Ground Operations. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 29(2), 125-128. <https://doi.org/10.1080/00022470.1979.10470766>
- Graver, B., Zhang, K., & Rutherford, D. (2019). 3CO2 emissions from commercial aviation, 2018. *International Council on Clean Transportation, 2019, September*, 13.
- ICAO. (2011). *International Civil Aviation Organization Airport Air Quality Manual*. <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Publications/FINAL.Doc.9889.1st.Edition.alltext.en.pdf>
- ICAO. (2019). ICAO global environmental trends - Present and future aircraft noise and emissions. *Icao, July*, 1-8. [https://www.icao.int/Meetings/A40/Documents/WP/wp\\_054\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/A40/Documents/WP/wp_054_en.pdf)
- Miller, B., Minoque, K., & Clarke, J. (2000). *Constraints in aviation infrastructure and surface aircraft emissions. January 2001*, 1-15.
- Mora, M. &, & Yusman, T. (2014). Pengaruh Kepadatan Lalu Lintas Penerbangan Pada Saat Taxi-Out Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Pesawat Udara ( Studi Kasus : Bandar Udara Internasional Soekarno Hatta ) The Effect of Air Traffic Congestion on Taxi-out Time and Aircraft Fuel Consumption ( Cas. *Jurnal Perhubungan Udara Warta Ardhia*, 40(4), 215-222.
- Norton, T. M. (2014). *Aircraft Greenhouse Gas Emissions during the Landing and Takeoff Cycle at Bay Area Airports*. 45. [https://repository.usfca.edu/capstone/15/?utm\\_source=repository.usfca.edu/capstone/15&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](https://repository.usfca.edu/capstone/15/?utm_source=repository.usfca.edu/capstone/15&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages)
- Pejovic, T., Noland, R. B., Williams, V., & Toumi, R. (2008). Estimates of UK CO2 emissions from aviation using air traffic data. *Climatic Change*, 88(3-4), 367-384. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9370-0>

