



Perhitungan Emisi Gas Buang Harian Mesin Pesawat Udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung

Daily Aircraft Engine Emission Calculation In Husein Sastranegara Airport Bandung

Minda Mora

Pusat Penelitian dan Pengembangan Perhubungan Udara

e-mail : mindamora25@gmail.com

INFO ARTIKEL

Histori Artikel :

Diterima : 20 Desember 2012

Disetujui : 28 Februari 2013

Keywords:

emission, airport, aircraft engine.

Kata kunci:

yield management, biaya operasional, jarak tempuh, multileg

ABSTRACT / ABSTRAK

Air transport contributes significantly to air pollution. Based on the reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), by 1992 the air transport accounted for 3.5% of the total anthropogenic radiative forcing of the atmosphere. It is expected to rise to 12.2%, in 2050. Furthermore, the airport is one area that has been the concentration of aircraft engine emissions. In this research, aircraft engines emission is calculated using actual data flights in airports (hybrid approach). This study aims to determine the amount of Carbon Monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x) generated daily from aircraft engine and then compared with the levels of CO and NO_x are allowed. The result shows that the levels of CO and NO_x generated daily from aircraft engines in Husein Sastranegara Airport- Bandung is still within normal limits.

Transportasi udara memberikan kontribusi yang signifikan terhadap polusi udara. Berdasarkan laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), pada tahun 1992 transportasi udara menyumbang 3,5% dari total *anthropogenic radiative forcing* di atmosfer. Hal ini diperkirakan akan meningkat menjadi sebesar 12,2%, pada tahun 2050. Selanjutnya, bandar udara merupakan salah satu area yang menjadi tempat terkonsentrasinya emisi gas buang pesawat udara. Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan emisi gas buang mesin pesawat udara dengan menggunakan data aktual penerbangan di bandar udara (pendekatan hibrid). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besaran Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x) harian yang dihasilkan dari mesin pesawat udara yang kemudian dibandingkan dengan kadar CO dan NO_x yang diperbolehkan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kadar CO dan NO_x harian yang dihasilkan dari mesin pesawat udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung masih dalam batas normal.

PENDAHULUAN

Transportasi udara memberikan kontribusi yang signifikan terhadap polusi udara. Berdasarkan laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), pada tahun 1992 transportasi udara menyumbang 3,5% dari total *anthropogenic radiative forcing* di atmosfer. Hal ini diperkirakan akan meningkat menjadi sebesar 12,2%, pada tahun 2050. Kondisi ini dipicu oleh pertumbuhan transportasi udara yang terus meningkat selama 1 (satu) dekade terakhir dan kecenderungan ini diperkirakan akan berlanjut di tahun-tahun mendatang. Lalu lintas penumpang yang menggunakan angkutan udara berjadwal meningkat 60% pada 10 tahun terakhir dan hasil peramalan menunjukkan pertumbuhan rata-rata pertahun sebesar 5% untuk 10 tahun sampai dengan 15 tahun mendatang [IPCC].

Dari pembakaran mesin pesawat udara dihasilkan emisi gas buang yang terdiri dari karbon dioksida (CO₂), uap air (H₂O), nitrogen oksida (NO_x), hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), sulfur oksida (SO_x) dan partikel-partikel lainnya yang berdampak terhadap kualitas udara lokal di area sekitar bandar udara dan berpengaruh terhadap perubahan iklim global.

Kualitas udara lokal dapat dipengaruhi oleh kadar CO dan NO_x di udara yang merupakan unsur *precursors* pembentukan salah satu senyawa beracun yaitu *tropospheric ozone*. Selain itu, Nitrogen oksida (NO_x) 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.

Industri penerbangan di Indonesia mengalami pertumbuhan yang sangat pesat beberapa tahun belakangan ini yang akan menyebabkan tingginya emisi gas buang dari sektor penerbangan. Data statistik angkutan udara menyebutkan jumlah penumpang, baik rute domestik maupun internasional meningkat dari tahun ke tahun. Pada tahun 2011 jumlah penumpang untuk rute domestik berjadwal sebesar ±61 juta atau naik 16% dibandingkan pada tahun 2010 dan jumlah penumpang untuk rute internasional berjadwal pada tahun 2011 sebesar ±8.2 juta atau naik 23% dibandingkan pada tahun 2010. Kondisi ini diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan akan diberlakukannya era *open sky* tahun 2015.

Selain itu, tahun 2011 juga mencatat pertambahan jumlah armada yang dilakukan oleh hampir setiap maskapai penerbangan, baik berupa pesawat baru atau pergantian tipe dan ukuran pesawat udara dari armada yang dioperasikan. Jumlah armada angkutan udara yang terdaftar tahun 2011 di Indonesia tercatat 1181 pesawat udara. Dari 1181 unit pesawat udara yang terdaftar, 907 pesawat udara aktif beroperasi yang terdiri dari 454 pesawat udara beroperasi di bawah AOC 121, 251 pesawat udara beroperasi di bawah AOC 135 dan 202 pesawat udara beroperasi di bawah

AOC 91. Jumlah keseluruhan pesawat udara ini meningkat dari tahun 2010 yang berjumlah 1122 pesawat udara [statistik angkutan udara].

Bandar udara merupakan salah satu area yang menjadi tempat terkonsentrasinya emisi gas buang pesawat udara. Dengan meningkatnya pertumbuhan lalu lintas pesawat udara, kualitas udara lokal di area bandar udara telah menjadi perhatian serius dalam pengoperasian bandar udara. Untuk mencegah bandar udara menjadi sumber polusi dan membahayakan kesehatan masyarakat yang bekerja dan tinggal di area sekitar dan membahayakan kesehatan masyarakat yang bekerja dan tinggal di area sekitar bandar udara, dilakukan penelitian Penghitungan Emisi Gas Buang Mesin Pesawat Udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung.

Berdasarkan latar belakang di atas, dirumuskan permasalahan penelitian sebagai berikut.

1. Berapakah besaran emisi harian mesin pesawat udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung?;
2. Bagaimanakah kondisi emisi harian mesin pesawat udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung dibandingkan dengan standar emisi yang diperbolehkan?

Tujuan penelitian adalah melakukan identifikasi besaran emisi gas buang harian mesin pesawat udara dan membandingkan dengan standar emisi yang diperbolehkan.

Manfaat penelitian adalah sebagai bahan masukan kepada pemangku kepentingan, khususnya pengelola

bandar udara dalam pengelolaan emisi gas buang mesin pesawat udara di bandar udara.

Dalam melakukan penelitian, dilakukan beberapa pembatasan masalah, yaitu:

- 1) Emisi gas buang yang dihitung adalah besaran karbon monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x);
- 2) Besaran karbon monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x) dihitung pada saat pesawat udara melakukan *taxi-out* (*push back* s.d *take off*);
- 3) Besaran karbon monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida dihitung untuk setiap penerbangan dalam satu hari;

TINJAUAN PUSTAKA

Jenis-Jenis Polutan

Kegiatan penerbangan menghasilkan berbagai jenis polutan udara yang berpotensi dapat berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan. Oleh karena itu, setiap negara harus membuat ketentuan/persyaratan terkait dengan polutan tersebut. Senyawa yang dianggap sebagai unsur utama emisi adalah sebagai berikut:

- 1) nitrogen oksida (NO_x), termasuk didalamnya nitrogen dioksida (NO₂) dan nitrogen oksida (NO);
- 2) volatile organic compounds (VOC), termasuk non-methane hydrocarbons (NMHC);
- 3) karbon monoksida (CO);
- 4) *particulate matter* (PM);
- 5) fraction size PM_{2.5} dan PM₁₀, dan
- 6) sulfur oksida (SO_x)

Sumber Emisi di Bandar Udara

Terdapat beraneka ragam dan sumber emisi yang dapat ditemukan di bandar udara. Namun, tergantung pada kegiatan-kegiatan khusus di bandar udara tertentu, tidak semua sumber emisi benar-benar ada (misalnya beberapa berada di luar bandar udara). sumber-sumber emisi di bandar udara dapat dikelompokkan ke dalam empat kategori, yaitu:

1) emisi pesawat udara.

Kategori emisi pesawat udara dapat dibagi menjadi dua yaitu mesin utama pesawat udara yang memberikan gaya dorong terhadap pesawat udara dan *Auxiliary Power Units* (APUs) yang memberikan sumber tenaga listrik dan pneumatic pada pesawat udara selama pengoperasian di darat.

2) emisi *aircraft handling*, dapat dikategorikan sebagai berikut:

- a) *Ground Support Equipment* (GSE) yang berfungsi untuk mengendalikan pesawat udara pada saat *turnaround* di *parking stand*: *ground power unit, air climate unit, aircraft tugs, conveyer belts, passenger stairs, forklifts, tractors, cargo loaders*, dll;
- b) *Airside traffic*. Lalu lintas kendaraan yang melayani di dalam perimeter bandar udara, seperti *sweepers, trucks catering, fuel, sewage*;
- c) *Aircraft refuelling*. Penguapan yang berasal dari tangki bahan bakar pesawat udara dan dari truk bahan bakar atau sistem

pipa selama operasi pengisian bahan bakar;

- d) *Aircraft de-icing*. Pemberikab de-icing dan anti-icing kepada pesawat udara selama musim dingin.
- 3) *infrastructure or stationary related sources*, terdiri dari:
- a) *Power/heat generating plant*. Fasilitas yang menghasilkan energi dari infrastuktur bandar udara;
 - b) *Emergency power generator. Diesel generators for emergency operations (e.g. for buildings or for runway lights)*;
 - c) Perawatan pesawat udara. Semua aktifitas dan fasilitas untuk perawatan pesawat udara, seperti pembersihan, pengecaca, tes mesin, dll.;
 - d) Perawatan bandar udara. Semua aktifitas untuk perawatan fasilitas bandar udara (*cleaning agents, building maintenance, repairs, greenland maintenance*) and *machinery (vehicle maintenance, paint shop)*;
 - e) *Fuel. Storage, distribution and handling of fuel in fuel farms and vehicle fuel stations*;
 - f) Aktifitas kontruksi. Semua aktifitas kontruksi yang terkait dengan pengoperasian dan pengembangan bandar udara;
 - g) Pelatihan pemadam kebakaran. Aktifitas pemadaman kebakaran dengan menggunakan beberapa jenis bahan bakar yang berbeda;
 - h) *Surface de-icing. Emissions of de-icing and anti-icing substances*

applied to aircraft moving areas and service and access roads.

- 4) lalu lintas kendaraan operasional bandar udara seperti sepeda motor, mobil, truk yang terkait dengan bandar udara pada *access roads, curbsides, drive-ups, and on- or off-site parking lots (including engine turn-off, startup and fuel tank evaporative emissions)*.

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 terhadap pesawat udara dan APUs (*Auxiliary Power Units*) yang menyediakan tenaga listrik dan udara pneumatic ketika pesawat udara parkir di *gate*.

Mesin utama umumnya dapat diklasifikasikan sebagai turbofan turbin gas (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 (EI), dan aliran bahan bakar mesin utama. Selain itu, 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. Berikut ini merupakan gambaran dasar parameter TIM dan EI.

- 1) *Time-in-Mode* (TIM) adalah periode waktu, biasanya diukur dalam hitungan menit, bahwa mesin pesawat benar-benar menghabiskan pada pengaturan daya yang diidentifikasi, biasanya berkaitan dengan salah satu modus operasi LTO (*Landing Take-off*) dari siklus penerbangan operasional.
- 2) Emisi Index (EI) dan aliran bahan bakar. Indeks emisi didefinisikan sebagai massa polutan yang dipancarkan per satuan massa bahan bakar dibakar untuk mesin tertentu. *The ICAO Engine Emission Data Bank* (EEDB) menyediakan data EI untuk tipe mesin bersertifikat dalam satuan gram polutan per kilogram bahan bakar (g/kg) untuk NO_x, CO dan HC, serta aliran bahan bakar di fase tertentu dalam satuan kilogram per detik (kg/s).

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].

a) *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.

b) *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 namun informasi ini lebih berkualitas dan mungkin lebih sulit untuk didapatkan. 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.

b) *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.

Organization (ICAO), terdapat 3 (tiga) pendekatan dalam melakukan perhitungan emisi gas buang pesawat udara, yaitu pendekatan sederhana (*simple approach*), pendekatan canggih (*advance approach*) dan pendekatan mutakhir (*sophisticated approach*). Setiap pendekatan memiliki tingkat akurasi dan kompleksitas yang berbeda (penjelasan lengkap di BAB II.D).

Dalam penelitian ini, perhitungan emisi gas buang mesin pesawat udara dilakukan dengan menggunakan pendekatan hibrid (*hybrid approach*) [*Airport Air Quality Manual, Doc. 9889*]. Pendekatan hibrid merupakan gabungan dari *advance approach* dan *sophisticated approach*. Parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung emisi gas buang mesin pesawat udara dengan menggunakan pendekatan hibrid adalah tampak pada tabel 2.

METODE PENELITIAN

Berdasarkan *Airport Air Quality Manual, Doc. 9889* yang dikeluarkan oleh International Civil Aviation

Tabel 1. Metode Pendekatan Perhitungan Emisi Gas Buang Mesin Pesawat Udara

Key parameters	Simple approach		Advanced approach		Sophisticated approach
Fleet (aircraft/engine combinations)	Identification of aircraft group types (e.g. all B737 or all A319/320/321)		Identification of aircraft and representative engine types (e.g. all A320 with 50% V2525 and 50% CFM56-5B5P)		Actual aircraft type/subtype and engine combination (by tail number and engine UID or similar)
Movement	Number of aircraft movements by aircraft type according to lock-up table and defined in "fleet"		Number of aircraft movements by aircraft-engine combinations as defined in "fleet"		Number of aircraft movements by aircraft tail number
Emissions calculation	Option A UNFCC look-up table (no calculation)	Option B Spreadsheet calculation	Performance-based calculation, potentially reflecting additional parameters like forward speed, attitude, ambient conditions (model dependent)		Performance-based with actual engine data (P3/T3) and including ambient conditions
Thrust levels		Option B Rated thrust	Option A Average airport and/or aircraft-group-specific reduced thrust rate	Option B Performance model calculated rated reduced thrust	Actual thrust provided by the air carrier
TIM	Option A N/A	Option B ICAO certification LTO	Option A Modified times in mode (airport-specific average or actual for one or several modes)	Option B Performance model calculated TIM	Movement-based actual values for all model
Fuel flow		Option B ICAO certification data bank values	Option B Derived from ICAO EEDB with thrust-to-fuel flow conversion model	Option B Derived from ICAO EEDB with performance model	Refined values using actual performance and operational data derived from the air carrier
EI	Option A UNFCC LTO emissions mass by aircraft type	Option B ICAO certification data bank values	Option A Derived from ICAO EEDB and thrust level through BFFM2 curve-fitting method	Option B Derived from ICAO EEDB through BFFM2 curve-fitting method	Refined values using actual performance and operational data derived from the air carrier
Start-up emissions	Not considered		Considered including – see 6.53 to 6.59		Consider including see 6.53 to 6.59
Engine deterioration	Do not consider – see 6.44 to 6.52		Do not Considered – see 6.44 to 6.52		Do not consider – see 6.44. to 6.52

Tabel 2. Parameter penghitungan emisi gas buang pesawat udara dengan menggunakan pendekatan hybrid

No	Parameter	Pendekatan Hybrid
1.	Armada (kombinasi pesawat udara dan mesin pesawat udara)	Menggunakan data aktual tipe pesawat udara dan mesin pesawat udara 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 aliran bahan bakar diambil dari <i>ICAO Emission Engine Database</i>

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 [Airport Air Quality Manual, Doc. 9889].

Data *time in mode* (TIM) (waktu aktual setiap penerbangan), pergerakan pesawat udara dan tipe pesawat udara

yang beroperasi di Bandar Udara Husein Sastranegara diperoleh dari pengelola lalu lintas udara, yaitu bagian *Apron Movement Control* (AMC) dan menara pengawas (*tower*). Data *specific fuel burn coefficient* dan *emission index* merupakan data-data yang terkait dengan jenis pesawat udara serta tipe mesin yang digunakan. Setiap pesawat

$$E_{ij} = TIM_j \times FF_{coefficient} \times EI_k \dots\dots\dots(1)$$

dimana,

E_{ij} = besar emisi unsur k dalam fase penerbangan j , [g];

TIM_j = waktu yang dibutuhkan dalam fase penerbangan j , [s];

$FF_{coefficient}$ = mode – specific fuel burn coefficient, [kg/s];

EI_k = emission index untuk unsur k , [g/kg fuel]

udara memiliki nomor registrasi kebangsaan yang terdapat di bagian ekor pesawat udara (*aircraft tail number*). Nomor registrasi kebangsaan tersebut bersifat unik untuk setiap pesawat udara. Berdasarkan informasi nomor registrasi kebangsaan, didapatkan data tipe mesin pesawat udara untuk setiap pesawat udara yang diperoleh di *Airline Fleet Directory*. 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*.

Analisis hasil penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan emisi harian mesin pesawat udara di Bandar Udara Husein Sastranegara dengan standar emisi harian yang diperbolehkan.



Gambar 3. Bandar Udara Husein Sastranegara

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian Profil Bandar Udara Husein Sastranegara

Bandar Udara Internasional Husein Sastranegara adalah sebuah bandar udara yang terletak di Kota Bandung,

Jawa Barat, Indonesia. Bandar udara ini dikelola oleh PT. Angkasa Pura II (Persero). Selain untuk melayani masyarakat, bandar udara ini juga merupakan salah satu pangkalan angkatan udara TNI. Bandar udara umum berlokasi di sebelah barat selatan sedangkan bandar udara militer

berlokasi di kanan barat selatan. Di sebelah utara landas pacunya merupakan hanggar-hanggar milik PT. Dirgantara Indonesia.

Data Penelitian

Berdasarkan hasil survei di Bandar Udara Husein Sastranegara Bandung, didapatkan data-data perusahaan jasa angkutan udara, jenis pesawat udara dan waktu operasi pesawat udara pada saat *taxi-out* yang disajikan dalam tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Perusahaan Jasa Angkutan Udara Komersil dan Jenis Pesawat Udara yang Beroperasi di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung

No.	Perusahaan	Jenis Pesawat Udara
1.	Merpati Nusantara	B737, F100, MA60
2.	Indonesia Air Asia	B737, A320
3.	Malaysian Air Asia	A320
4.	Sriwijaya Air	B737, F28
5.	Wings Air	ATR 72
6.	Susi Air	Cessna208, Piaggio P180
7.	Nusantara Buana Air	C212
8.	Pelita Air Service	RJ85
9.	Lion Air	H25B
10.	White Sky Aviation	DHC8
11.	Airfast	Embraer E135, BA46
12.	Transwisata	C212
14.	Silk Air	A319
15.	Indonesia Air Transport	A320

Tabel 4. Waktu Operasi Pesawat Udara pada saat *Taxi-out*, hari Senin, 25 Februari 2013

No.	Registrasi	Tipe Pesawat	<i>Push back time</i>	<i>Take off time</i>	<i>Taxi time</i>
			(WIB)	(WIB)	(menit)
1	PK TAA	A320	5:20	5:26	6
2	PK AXZ	A320	5:35	5:38	3
3	PK MOT	B735	6:06	6:09	3
4	PK LJR	B738	6:12	6:18	3
5	PK MZD	MA 60	6:23	6:27	4
6	PK AXV	A 320	7:00	7:00	-
7	PK MZH	MA 60	8:25	8:35	10
8	PK AXU	A320	8:22	8:27	5
9	GM AFU	A 320	8:12	8:15	3
10	PK AXD	A320	8:02	8:03	1

11.	Airfast	Embraer E135, BA46
12.	Transwisata	C212
14.	Silk Air	A319
15.	Indonesia Air Transport	A320

Tabel 5. Waktu Operasi Pesawat Udara pada saat *Taxi-out*, hari Senin, 25 Februari 2013

No.	Registrasi	Tipe Pesawat	<i>Push back time</i>	<i>Take off time</i>	<i>Taxi time</i>
			(WIB)	(WIB)	(menit)
1	PK TAA	A320	5:20	5:26	6
2	PK AXZ	A320	5:35	5:38	3
3	PK MOT	B735	6:06	6:09	3
4	PK LJR	B738	6:12	6:18	3
5	PK MZD	MA 60	6:23	6:27	4
6	PK AXV	A 320	7:00	7:00	-
7	PK MZH	MA 60	8:25	8:35	10
8	PK AXU	A320	8:22	8:27	5
9	GM AFU	A 320	8:12	8:15	3
10	PK AXD	A320	8:02	8:03	1
11	PK MZD	MA 60	10:00	10:04	4
12	PK AXZ	A320	9:51	9:47	-
13	PK LJR	B738	10:11	10:23	12
14	PK LJY	B738	10:31	10:38	7
15	PK TAA	A320	10:21	10:35	14
16	PK LKH	B738	11:15	11:19	4
17	PK LJS	B738	12:48	12:59	11
18	PK AXV	A320	11:35	11:42	7
19	PK GLC	A320	12:39	12:47	8
20	PK GFL	B738	13:32	13:36	4
21	PK AXZ	A320	13:59	14:13	14
22	PK TAA	A320	13:42	13:48	6
23	PK WFR	ATR 72	14:35	14:39	4
24	PK LJY	B738	16:20	16:23	3
25	PK LKH	B738	16:05	16:07	2
26	GV SLC	A320	16:32	16:35	3
27	PK LJR	B738	16:28	16:38	10
28	PK LJS	B738	17:50	17:56	6
29	PK AXV	A320	17:01	17:05	4

30	PK TAA	A320	18:05	18:06	1
31	PK AXZ	A320	19:12	19:16	4
32	PK AXJ	A320	20:27	20:31	4
33	PK AXD	A320	21:32	21:38	6
<i>Taxi-out time rata-rata</i>					6 menit

Sumber : Pengelola lalu lintas udara, Bandar Udara Husein Sastranegara Bandung

Berdasarkan nomor registrasi pesawat udara, diperoleh data tipe mesin pesawat udara serta data *specific fuel burn coefficient* dan *emission index* untuk setiap jenis mesin pesawat udara.

Tabel 5. *Specific Fuel Burn Coefficient dan Emission Index*

No.	Registrasi	Tipe pesawat	Tipe mesin pesawat udara	Emission Index (EI)		<i>fuel flow coefficient</i> kg/s
				[g/kg fuel] CO	NOx	
1	PK TAA	A320	CFM56-5A3	0,900	26,400	1,131
2	PK AXZ	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
3	PK MOT	B735	CFMI CFM56-3C1	0,9	20,7	1,154
4	PK LJR	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
5	PK MZD	MA 60	Pratt & Whitney Canada PW127	0,68	21,03	1,169
6	PK AXV	A 320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
7	PK MZH	MA 60	Pratt & Whitney Canada PW127	0,68	21,03	1,169
8	PK AXU	A320	CFMI CFM56-5B6	0,17	17,73	0,965
9	GM AFU	A 320	CFMI CFM56-5B6	0,17	17,73	0,965
10	PK AXD	A320	CFMI CFM56-5B6	0,17	17,73	0,965
11	PK MZD	MA 60	Pratt & Whitney Canada PW127	0,68	21,03	1,169
12	PK AXZ	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
13	PK LJR	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
14	PK LJY	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
15	PK TAA	A320	CFM56-5A3	0,900	26,400	1,131
16	PK LKH	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
17	PK LJS	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
18	PK AXV	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
19	PK GLC	A320	IAE V2527-A5	0,53	26,5	1,053
20	PK GFL	B738	CFMI CFM56-7B26	0,2	21,8	1,2
21	PK AXZ	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
22	PK TAA	A320	CFM56-5A3	0,900	26,400	1,131

23	PK WFR	ATR 72	PWC PW127F	0,68	-	-
24	PK LJY	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
25	PK LKH	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
27	PK LJR	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
28	PK LJS	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2
29	PK AXV	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
30	PK TAA	A320	CFM56-5A3	0,900	26,400	1,131
31	PK AXZ	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
32	PK AXJ	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965
33	PK AXD	A320	CFMI CFM56-5B6	0,2	17,73	0,965

[ICAO Engine Performance Database]

Hasil Pengolahan Data Penelitian

Dengan menggunakan perumusan (1), dilakukan penghitungan besaran emisi gas buang mesin pesawat udara untuk polutan CO dan NO_x untuk setiap penerbangan dalam satu hari. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Emisi Harian Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x)

No.	Registrasi	Tipe Pesawat Udara	Tipe mesin pesawat udara	Emission Index (EI) [g/kg fuel]		<i>fuel flow coefficient</i> kg/s	Emisi (gram)	
				CO	Nox		CO	NOx
1	PK TAA	A320	CFM56-5A3	0,900	26,400	1,131	366	10749
2	PK AXZ	A320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965	30	3080
3	PK MOT	B735	CFMI CFM56-3C1	0,9	20,7	1,154	187	4300
4	PK LJR	B738	CFMI CFM56-7B26E	0,2	21,8	1,2	43	4709
5	PK MZD	MA 60	Pratt & Whitney Canada PW127	0,68	21,03	1,169	191	5900
6	PK AXV	A 320	CFMI CFM56-5B6/3	0,17	17,73	0,965	-	-
7	PK MZH	MA 60	Pratt & Whitney Canada PW127	0,68	21,03	1,169	477	14750
8	PK AXU	A320	CFMI CFM56-5B6	0,17	17,73	0,965	49	5133
9	GM AFU	A 320	CFMI CFM56-5B6	0,17	17,73	0,965	30	3080
10	PK AXD	A320	CFMI CFM56-5B6	0,17	17,73	0,965	10	1027

Tabel 7. Emisi Harian Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x) dari Mesin Pesawat Udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung

	Emisi Harian (gram/hari)	Emisi Harian
Karbon Monoksida (CO)	4411	0,27 PPB
Nitrogen Oksida (NO _x)	246994	15 PPB

Catatan: PPB = *Part per Billion*; PPM = *Part per Million*

Tabel 8. Perbandingan Emisi Harian Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x) Mesin Pesawat Udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung dengan Kadar Harian CO dan No_x yang Diperbolehkan

	Emisi Harian	Kadar Maksimal Harian yang Diperbolehkan*
Karbon Monoksida (CO)	0,27 PPB	9PPM
Nitrogen Oksida (NO _x)	15 PPB	53 PPB

*www.epa.com

PEMBAHASAN

Pada **tabel 3** dan **tabel 4**, diketahui dilakukan 33 kali penerbangan komersial dari Bandar Udara Husein Sastranegara Bandung, pada hari Senin, 25 Februari 2013. Terdapat 5 (lima) jenis pesawat udara yang melakukan penerbangan pada hari tersebut, yaitu pesawat udara jenis A320, B737-500, B737-800, MA-60 dan ATR72. Berdasarkan nomor registrasi kebangsaan masing-masing pesawat udara, diperoleh jenis mesin yang digunakan oleh setiap pesawat udara tersebut. Secara umum, pesawat udara jenis A320 dan B737series menggunakan mesin CFM56 yang diproduksi oleh CFM International. Sedangkan pesawat udara jenis MA-60 dan ATR72 menggunakan mesin PW127 yang diproduksi oleh Pratt&Whitney.

Berdasarkan data pergerakan pesawat pesawat udara yang diperoleh dari pengatur lalu lintas udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung, diperoleh waktu yang diperlukan oleh setiap penerbangan dalam melakukan *taxi-out*, mulai pesawat udara *push-back* dari apron sampai dengan lepas landas (**Tabel 4**). Lama waktu *taxi-out* setiap penerbangan bervariasi, mulai yang tercepat selama 1 menit sampai dengan yang paling lama, yaitu selama 14 menit. Rata-rata waktu *taxi-out* dari 33 kali penerbangan adalah selama 6 menit. Waktu yang dibutuhkan untuk *taxi-out* ini jauh lebih kecil dibandingkan waktu referensi *taxi-out* yang ditetapkan oleh ICAO yaitu selama 26 menit (ICAO Airport Air Quality Manual, Doc. 9889).

Dengan menggunakan *hybrid approach* dan persamaan 1, dihitung besaran emisi gas buang mesin pesawat udara untuk polutan Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x) untuk setiap penerbangan pada Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung. Besaran Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x) harian adalah penjumlahan CO dan NO_x yang dihasilkan dari 33 kali penerbangan. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh emisi harian mesin pesawat udara, yaitu CO sebesar 4411 gram/hari atau 0,27 *Part Per Billion* (PPB) dan NO_x sebesar 246994 gram/hari atau 15 PPB.

Environmental Protection Agency (EPA) telah menetapkan standar kualitas udara terhadap 6 jenis polutan, termasuk standar untuk Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x). Kadar maksimal harian CO yang diperbolehkan adalah sebesar 9 PPM. Hasil perhitungan menunjukkan kadar polutan CO yang dihasilkan oleh mesin pesawat udara di area Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung adalah sebesar 0,27 PPB. Hal ini menunjukkan bahwa kadar CO yang dihasilkan oleh pengoperasian pesawat udara pada saat *taxi-out* masih sangat kecil apabila dibandingkan dengan kadar maksimal harian yang diperbolehkan. Kondisi yang sama juga berlaku untuk polutan NO_x. Kadar maksimal NO_x harian yang diperbolehkan adalah sebesar 53 PPB, sedangkan NO_x yang dihasilkan oleh pesawat udara pada saat *taxi-out* hanya sebesar 15 PPB.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada BAB IV, dapat diambil beberapa kesimpulan penelitian sebagai berikut:

CO harian yang dihasilkan dari mesin pesawat udara adalah sebesar 4411 gram/hari atau 0,27 *Part Per Billion* (PPB) sedangkan NO_x harian yang dihasilkan dari mesin pesawat udara adalah sebesar 246994 gram/hari atau 15 PPB.

Kadar CO dan NO_x yang dihasilkan oleh mesin pesawat udara di Bandar Udara Husein Sastranegara-Bandung masih di bawah standar maksimal CO dan NO_x yang diperbolehkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Miller, B. et al, *Constraints in aviation infrastructure and surface aircraft emissions*, Massachusetts Institute of Technology.
<http://areco.org/AQ%20Aircraft%20Surface%20Constraints%20Miller.pdf>, diakses tanggal 1 November 2012.
- IPCC. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere*. New York : Cambridge University Press.
- Anagnostakis, I. et al. Observations of Departure Processes at Logan Airport to Support the Development of Departure Planning Tools. *Air Traffic Control Quarterly Journal (revised from the conference version), Special Issue in Air Traffic Management*, Volume 7, Number 4, 1999.
- ICAO, *Aircraft Engine Emissions Data Bank*, First Edition 1995, ICAO, Doc 9646-AN/943.

Baughcum, S. L., et al, *Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1992: Database Development and Analysis*, NASA Contractor Report 4700, April 1996.

Lee, Joosung J., *Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost and Emissions*, S.M. (2000). Thesis, Dept. of Aeronautics and

Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Olivier, J. G. J. (1995). *Scenarios for Global Emissions from Air Traffic*, National Institute of Public Health and the Environment, Netherlands, Report Nr. 7733002003.