

Sektor Penerbangan Global dalam Isu Perubahan Iklim : Dampak dan Mitigasinya

Global Aviation Sectors on Climate Change Issue : Impact and Mitigation

Dinar Dewi Kania^{a1*}, Dian Artanti Arubusman^{b2}, Mustika Sari^{c3}

^{abc} Institut Transportasi dan Logistik (ITL) Trisakti

^{1*} dinar.insists@gmail.com, ²dianartanti27@yahoo.com, ³mustika0017@gmail.com

*corresponding e-mail

This is an open access article under the terms of the **CC-BY-NC** license

ABSTRACT

Climate change has become an important issue in the global aviation sector. However, the growth of CO₂ and Greenhouse Gas emissions from the global aviation sector continues to increase in line with the demand for aviation services. This paper aims to describe the growth of global aviation industry which has an impact on the increasing of carbon emissions (CO₂) trend globally and the mitigation efforts to anticipate weather worsening in the future. The result shows that the growth of Passenger Kilometer Revenue (RPK) on international flights since 2010 has continued to increase significantly. In general, the global aviation industry (including domestic and international; both passenger and cargo) is estimated to contribute to climate change through 1.9% greenhouse gas emissions (which includes all greenhouse gases) and 2.5% CO₂ emissions, and 3. 5% of "Effective Radiative Forcing" (ERF). The reduction of CO₂ emissions from the aviation sector includes: 1) improvement of technological efficiency; 2) increased operational efficiency, 3) Use of alternative fuels, 4) change the travel behaviour, etc. Moreover, the mitigation strategies to reduce the impact of AIC (Aircraft-Induced Clouds) in the short term and at low cost can be carried out by operational changes to the aircraft trajectory and adaptation of jet engine fuel.

Keywords : *climate change, aviation emission, global aviation impact, mitigation strategy*

ABSTRAK

Perubahan iklim telah menjadi isu penting pada sektor penerbangan global. Namun sayangnya, pertumbuhan emisi CO₂ dan Gas Rumah Kaca dari sektor penerbangan global terus meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah permintaan terhadap jasa penerbangan. Tulisan ini bertujuan untuk memaparkan pertumbuhan industri penerbangan global yang memiliki dampak terhadap tren peningkatan emisi karbon (CO₂) secara global serta upaya mitigasi yang harus dilakukan untuk mengantisipasi memburuknya iklim di masa mendatang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan *Revenue Passenger Kilometer* (RPK) pada penerbangan internasional sejak 2010 terus mengalami peningkatan secara signifikan. Secara umum,

industri penerbangan global (termasuk domestik dan internasional; baik penumpang dan kargo) diperkirakan berkontribusi terhadap perubahan iklim melalui 1,9% emisi gas rumah kaca (yang mencakup semua gas rumah kaca) dan 2,5% emisi CO₂, serta 3,5% dari “*Effective Radiative Forcing*” (ERF). Upaya pengurangan emisi CO₂ dari sektor penerbangan meliputi: 1) peningkatan efisiensi teknologi; 2) peningkatan efisiensi operasional, 3) Penggunaan bahan bakar alternatif, 4) mengubah perilaku perjalanan, dll. Selain itu, strategi mitigasi untuk mengurangi dampak AIC (*Aircraft-Induced Clouds*) dalam jangka pendek dan berbiaya rendah dapat dilakukan dengan perubahan operasional lintasan pesawat dan adaptasi bahan bakar mesin jet.

Kata kunci: perubahan iklim, emisi penerbangan, dampak penerbangan global, strategi mitigasi

A. Pendahuluan

Memperkirakan emisi dari industri penerbangan tidak sama dengan sektor lainnya karena 65% dari emisi CO₂ berada di wilayah udara internasional dan tidak selalu berada di wilayah suatu negara. Selain itu, penerbangan memiliki ketergantungan besar pada bahan bakar *liquid fossil* dan regulasi keselamatan yang ketat, serta waktu pengembangan pesawat dan waktu pergantian armada yang lama. Sehingga tidak dimungkinkan baik secara finansial maupun teknologi pergantian armada pesawat secara masif dan cepat sebagaimana yang terjadi pada kendaraan bermotor (Lee & Foster, 2020). Secara umum, industri penerbangan global (termasuk domestik dan internasional; baik penumpang dan kargo) dalam studi yang dilakukan *the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), diperkirakan berkontribusi terhadap perubahan iklim melalui 1,9% emisi gas rumah kaca (yang mencakup semua gas rumah kaca) dan 2,5% emisi CO₂, serta 3,5% dari “*Effective Radiative Forcing*” (ERF). (Waitz, Townsend, Cutcher-Gershenfeld, Greitzer, & Kerrebrock, 2004).

Effective Radiative Forcing (ERF) merupakan ukuran ketidakseimbangan dalam sistem energi atmosfer Bumi sejak zaman pra-industri dan diukur dalam Watt per meter persegi. ERF digunakan sebagai metrik perubahan iklim untuk memungkinkan perbandingan antara gas rumah kaca yang berbeda dan dampak lain yang mempengaruhi sistem iklim - seperti perubahan albedo - karena diduga memiliki hubungan linier

dengan perubahan suhu permukaan rata-rata global (Lee & Foster, 2020). *Radiative forcing* (RF) adalah ukuran ketidakseimbangan dalam budget radiasi Bumi yang disebabkan oleh perubahan konsentrasi gas dan aerosol atau *cloudiness* (Fahey et al., 2016). *Radiative Forcing* telah menjadi dasar ukuran (*metric-base*) yang ditetapkan untuk menilai relevansi kontributor terhadap perubahan iklim global selama beberapa dekade (Bickel, Ponater, Bock, Burkhardt, & Reineke, 2020) (Ritchie, 2020).

Emisi karbon (CO₂) dari penerbangan merupakan komponen yang relatif mudah dipahami. Dengan menggunakan data historis dapat dihitung total emisi kumulatif historis CO₂ yaitu berjumlah sekitar 32,6 miliar ton sejak tahun 1940 dan hampir 50% emisi tersebut dihasilkan dalam 20 tahun terakhir. Namun, emisi CO₂ yang dihasilkan industri penerbangan bukan satu-satunya faktor yang berdampak pada perubahan iklim. Emisi CO₂ juga dianggap mewakili 34% dari “*effective radiative forcing*” (ERF) dari sektor penerbangan. Sedangkan 66% ERF lainnya berasal dari efek non-CO₂, terutama dari cirrus kontrail dan emisi nitrogen oksida (NO_x). Selain itu, emisi non-CO₂ ini memiliki potensi dampak yang besar, berupa jelaga dan belerang, karena membentuk “aerosol sulfat” yang akan mempengaruhi awan tingkat tinggi dan rendah. Namun, penelitian sains belum bisa menjelaskan secara pasti besarnya dampak atau tanda-tanda dari faktor tersebut terhadap efek pemanasan atau pendinginan secara keseluruhan (Lee & Foster, 2020).

Beberapa wilayah di dunia diperkirakan akan mengalami dampak dari industri penerbangan yang lebih tinggi daripada wilayah lainnya karena populasi dan pertumbuhan ekonomi di masa depan kemungkinan besar tidak sama. Misalnya, trend perkembangan di Asia yang pesat selama beberapa dekade terakhir sehingga kawasan ini kemungkinan akan menjadi penyumbang emisi regional yang tinggi seperti Eropa Tengah dan Amerika Serikat bagian timur (Chen & Gettelman, 2016). Oleh karena itu, tulisan ini bertujuan untuk memaparkan tingkat pertumbuhan industri penerbangan global yang memiliki dampak terhadap trend peningkatan emisi karbon (CO₂) secara global dari sektor ini. Selain itu, dampak industri penerbangan terhadap perubahan iklim global akan dijelaskan termasuk upaya mitigasi yang harus dilakukan untuk mengantisipasi memburuknya iklim global di masa mendatang.

B. Metode Penelitian

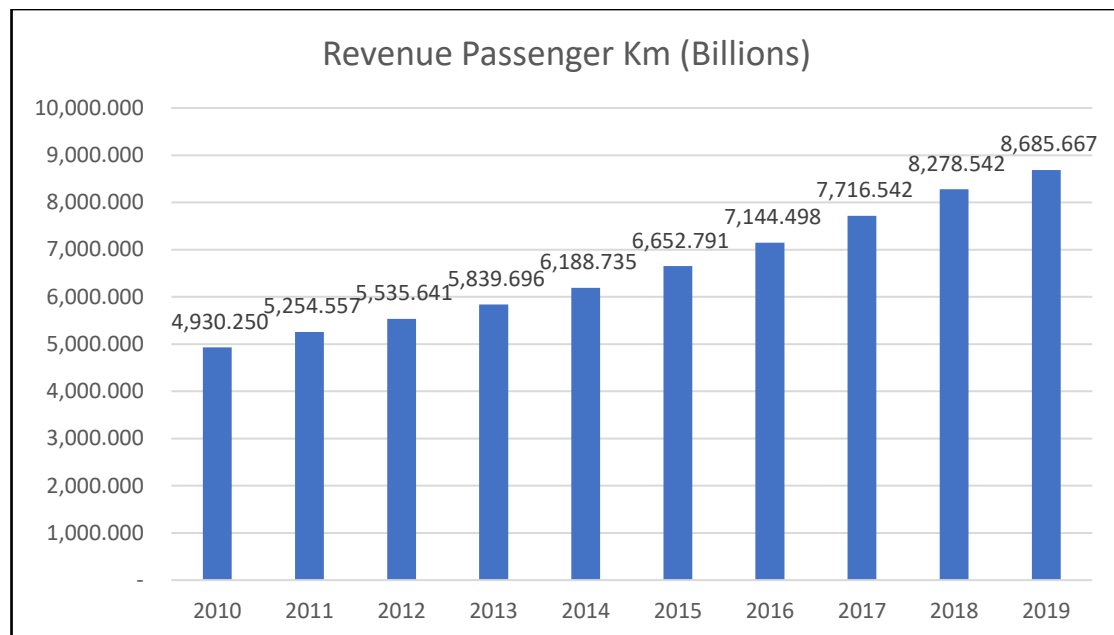
Penelitian ini merupakan penelitian studi pustaka dengan pengumpulan data menggunakan metode dokumentasi. Dokumentasi adalah laporan tertulis dari suatu peristiwa yang berisi penjelasan dan pemikiran terhadap peristiwa tersebut dan ditulis dengan sengaja untuk disimpan atau meneruskan keterangan tentang peristiwa tersebut. Penelitian ini mempelajari dan

menganalisis berbagai dokumen resmi ICAO terkait kebijakan lingkungan, khususnya isu perubahan iklim. Dokumen lainnya yang dipelajari adalah dokumen Uni Eropa, laporan dari LSM internasional terkait lingkungan di sektor penerbangan seperti Transport & Environment dari Inggris, serta The International Council of Clean Transportation (the ICCT), Amerika Serikat, serta artikel-artikel jurnal ilmiah yang relevan dengan topik yang dipilih.

C. Hasil dan Pembahasan

1. Pertumbuhan Industri Penerbangan Global

Tambahan daya beli dari miliaran lebih populasi dunia, dikombinasikan dengan penurunan harga tiket dari *low-cost-carrier* (LCC) dan juga *ultra-cost-carrier*, serta layanan pengiriman yang lebih cepat dalam e-commerce yang sedang berkembang, secara signifikan akan meningkatkan perjalanan udara dan mendorong permintaan melalui jasa pengiriman udara. Kekuatan ekonomi saat ini telah mempengaruhi penerbangan global. ICAO melaporkan bahwa pada Januari 2018 "lebih dari setengah dari 1,4 miliar wisatawan dunia yang melakukan perjalanan melintasi perbatasan internasional (pada 2017) menggunakan jasa transportasi udara," dan 90 persen transaksi *cross-border business-to-consumer* (seperti ritel online) diangkut melalui kargo udara (Overton, 2019).

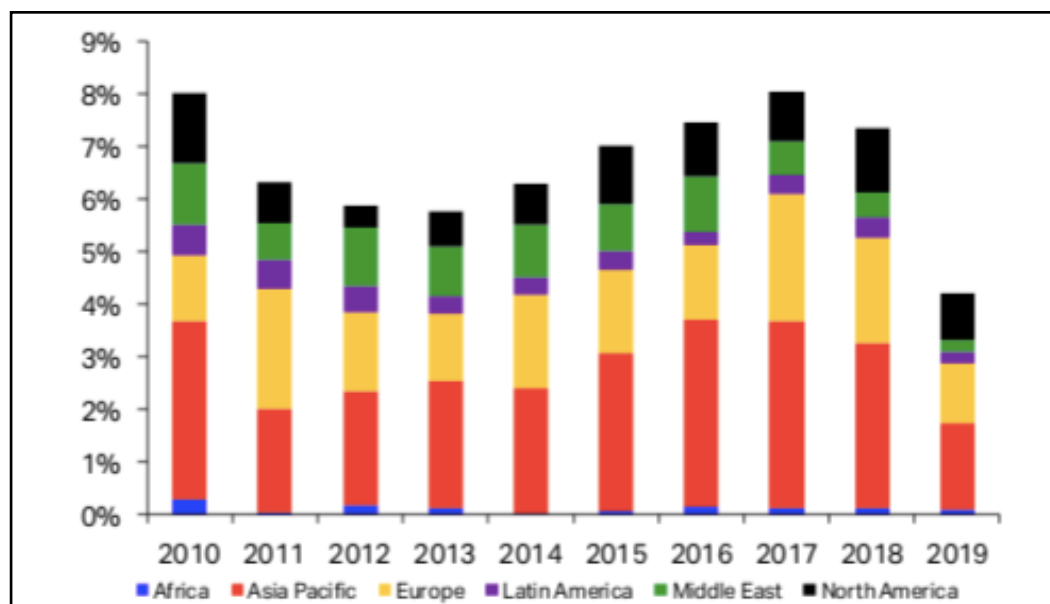


Sumber : (International Civil Aviation Organisation (ICAO), 2019)

Gambar 1. Revenue Passenger Kilometer (RPK) Penerbangan Domestik Dan Internasional 2010 - 2019

Pertumbuhan *Revenue Passenger Kilometer* (RPK) pada penerbangan internasional sejak 2010 terus mengalami peningkatan secara signifikan. Menurut statistik ICAO pada awal tahun 2019, jumlah total penumpang yang dibawa pada penerbangan berjadwal mengalami

peningkatan naik menjadi 4,5 miliar pada tahun 2019, yang 3,6 persen lebih tinggi dari tahun sebelumnya. Sementara itu, jumlah keberangkatan mencapai 38,3 juta pada tahun 2019, yang berarti terjadi pertumbuhan sebanyak 1,7 persen (International Civil Aviation Organization, 2019).

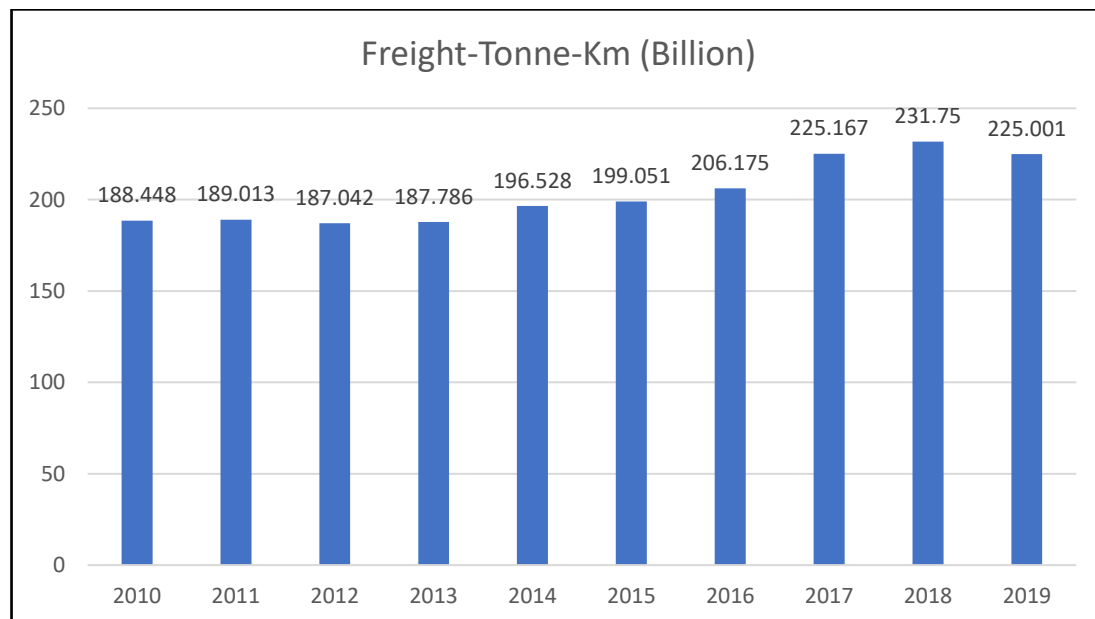


Gambar 2. Kontribusi Airline Berdasarkan Registrasi Regional terhadap Pertumbuhan Revenue Passenger Kilometre (RPK)

Sumber : International Air Transport Association (International Air Transport Association (IATA), 2019)

Grafik pada gambar 2 menunjukkan pertumbuhan industri penerbangan global dari tahun 2010 – 2019 berdasarkan kontribusi airline per kawasan terhadap *Revenue Passenger Kilometre* (RPK). Pertumbuhan permintaan penumpang udara pada tahun 2019 menurun dari tahun 2018 dan dari pertumbuhantahunan (7.3%) meskipun RPK meningkat sebesar 4,2% . Pendorong utama penurunan ini adalah fenomena perlambatan ekonomi global, menurunnya aktivitas perdagangan dunia dan adanya berbagai ketegangan politik dan geopolitik di seluruh wilayah (International Air Transport Association (IATA), 2019). Kontribusi tertinggi terhadap RPK global pada periode tersebut ditempati oleh kawasan Asia Pasifik

yang berhasil menggeser wilayah Eropa ke urutan ke-2. Pada urutan selanjutnya adalah wilayah Amerika Utara dan Timur Tengah, sedangkan kontribusi terendah terhadap RPK global adalah kawasan afrika. Dengan terdapatnya keragaman ekonomi dan demografi, setiap dari sub-kawasan di Asia Pasifik memberikan kontribusi terhadap pertumbuhan kawasan dengan cara yang berbeda. Beberapa negara di Asia Pasifik juga merupakan negara yang memiliki pertumbuhan ekonomi tercepat di dunia dimana kekuatan ekonomi dan pertumbuhan disposable income dikombinasikan dengan strategi airline yang baru dan model-model bisnis (Boeing, 2019).

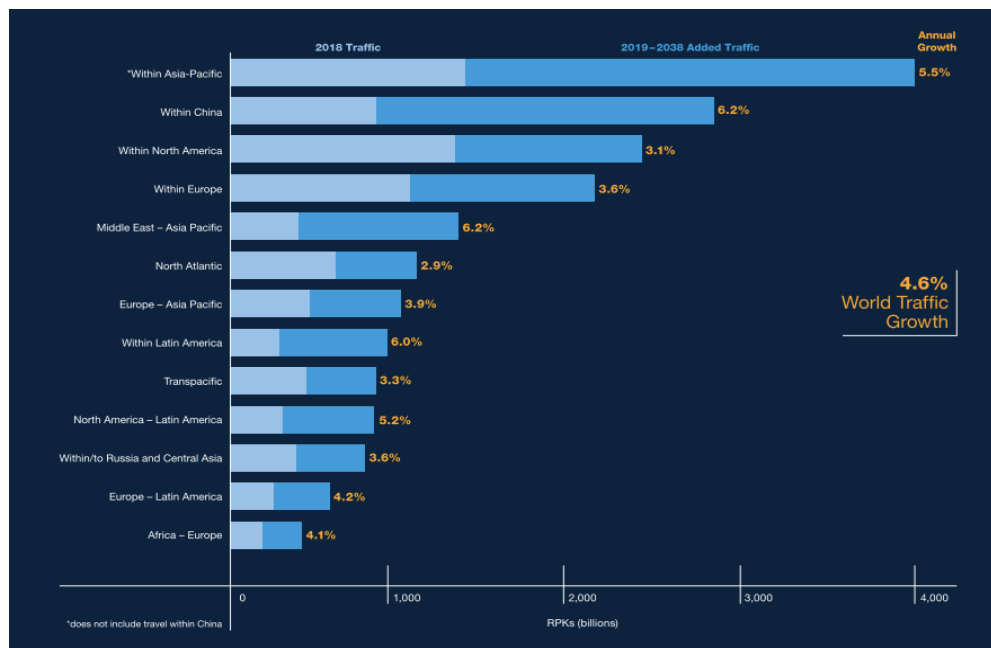


Sumber : (International Civil Aviation Organisation (ICAO), 2019)

Gambar 3. Freight Tonne Kilometer (RTK) Penerbangan Domestik Dan Internasional 2010 - 2019

Pertumbuhan kargo sektor internasional dan domestik juga terus mengalami pertumbuhan sejak 2010 meskipun tidak sebesar pertumbuhan penumpang. Pada tahun 2010 Freight Tonne-Km sebesar 188.448 juta dan pada tahun 2018 mencapai 231,750. Pada awal tahun 2019 FTK sudah mencapai 225.001 juta, namun di akhir tahun 2019 terjadi pandemi Covid yang melanda negara

China dan kemudian menyebar ke seluruh dunia yang menyebabkan penurunan lalu lintas udara global. Penerbangan kargo dan juga penerbangan penumpang diperkirakan akan terus meningkat apabila tidak terjadi pandemi Covid-19 di akhir tahun 2019 sebagaimana perkiraan pertumbuhan lalu lintas udara di bawah ini :



Sumber : (Boeing, 2019)

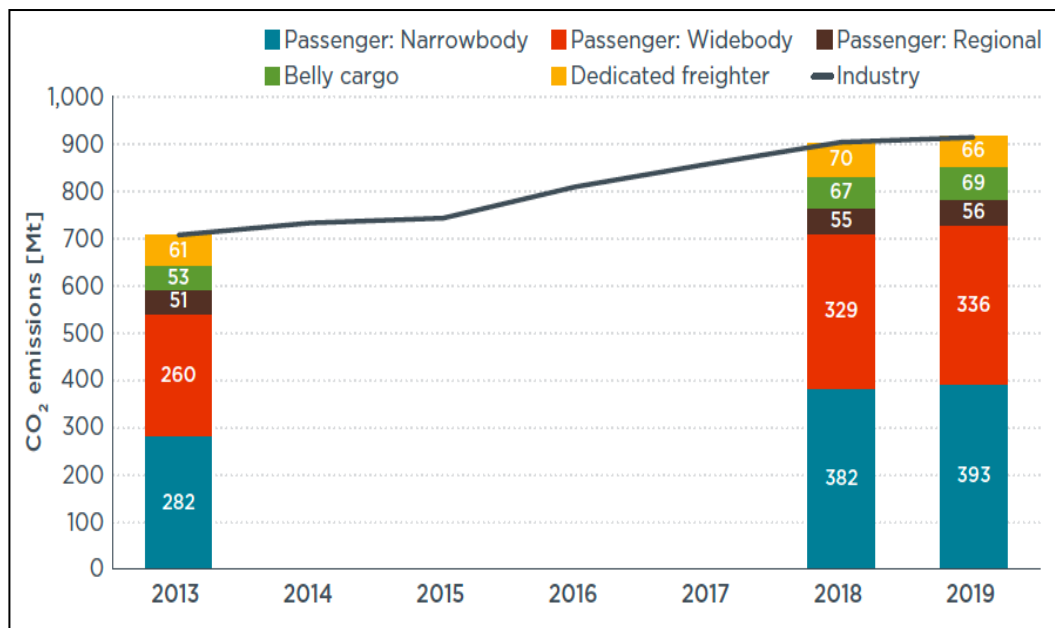
Gambar 4. Perkiraan Lalu Lintas Udara Global Periode 2019 - 2038

Boeing dalam laporannya yang diliris pada tahun 2019 memperkirakan pertumbuhan lalu lintas global di dunia akan mencapai 4,6% dalam periode 2019-2038 (lihat gambar 4). Laporan ini tentunya belum memperhitungkan pandemi Covid-19 yang melanda dunia di akhir tahun 2019. Berdasarkan laporan tersebut, lalu lintas udara tertinggi diperkirakan berada dalam wilayah Asia-Pasifik, dengan pertumbuhan tahunan rata-rata sebesar 5,5%. Sedangkan posisi kedua ditempati oleh lalu lintas di dalam wilayah domestik China, namun rata-rata pertumbuhan tahunannya justru menempati urutan pertama yaitu 6,2%. Posisi selanjutnya adalah lalu lintas udara di wilayah

Amerika Utara, namun dengan laju pertumbuhan yang tidak terlalu tinggi, yaitu sebesar 3,1%.

2. Perkembangan Emisi CO₂ pada Sektor Penerbangan Global

Pada 2013 dan 2018, penerbangan penumpang (*passenger flight*) bertanggung jawab atas 84% dan 85% emisi CO₂ dari seluruh sektor penerbangan. Pertumbuhan emisi CO₂ dari penerbangan global selama 2013, 2018 dan 2019 menurut laporan dari The International Council on Clean Transportation (ICCT), Amerika Serikat, adalah sebagai berikut:

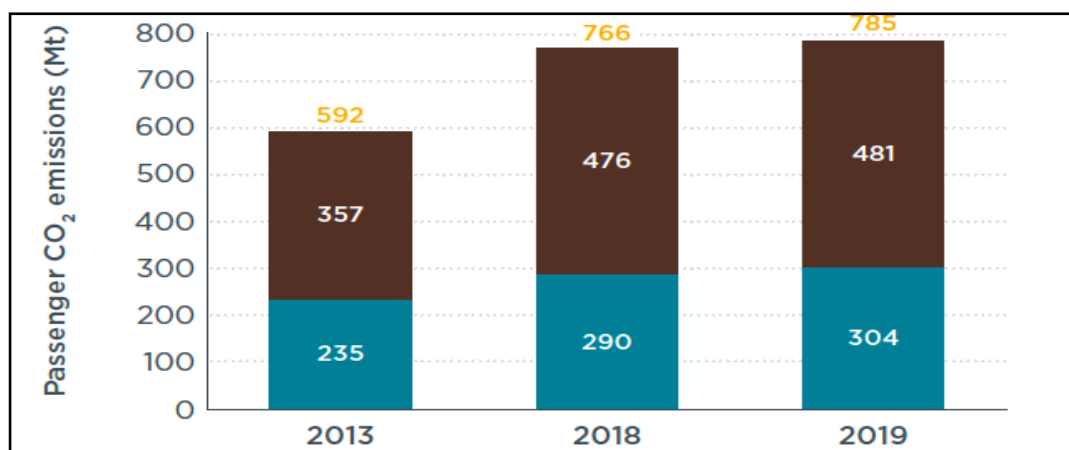


Sumber: The International Council on Clean Transportation (Graver, Rutherford, & Zheng, 2020)

Gambar 5. Emisi CO₂ Berdasarkan Kegiatan Operasional dan Kategori Pesawat

Menurut ICCT, lebih dari 60% dari semua penerbangan penumpang dioperasikan pada pesawat *narrow-body* pada 2019 yang berarti menyumbang lebih dari setengah pada semua RPK dan emisi CO₂ penumpang (Gambar 2.4). Pesawat penumpang global rata-rata menghasilkan 90 g CO₂ per RPK pada 2019, lebih rendah 2% dari 2018, dan 12% lebih rendah dari 2013. Namun Pesawat regional yang lebih kecil yang digunakan

pada penerbangan yang lebih pendek memancarkan hampir 80% lebih banyak CO₂ per RPK daripada rata-rata global untuk semua pesawat. Jenis pesawat yang lebih baru seperti Airbus A320 Neo (*narrowbody*) dan Boeing 787-9 (*widebody*) memancarkan antara 30% dan 50% lebih sedikit CO₂ per RPK daripada pesawat lama yang tidak efisien (Graver et al., 2020).



Sumber: The International Council on Clean Transportation(Graver et al., 2020)

Gambar 6. Emisi CO₂ Dari Penumpang Pesawat Udara

Pada periode antara 2013 dan 2019, jumlah total keberangkatan penerbangan di seluruh dunia meningkat sebesar 23%, RPK juga mengalami peningkatan 50%, dan tentunya emisi CO₂ yang dihasilkan angkutan penumpang juga meningkat 33% (Gambar 2.5). Namun, emisi CO₂ dari sektor penerbangan internasional mengalami

peningkatan sebesar 35%, melampaui kenaikan emisi sebesar 30% dari penerbangan domestik. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa emisi CO₂ terus meningkat dari tahun ke tahun mengikuti pertumbuhan industri penerbangan terutama sektor penerbangan internasional (Graver et al., 2020).

Tabel 1. Emisi CO₂ Penumpang Berdasarkan Rute Regional (2013, 2019 dan 2019)

2019 Rank	Grup Rute	Emisi CO ₂ (Mt)			Perubahan (2013-2019)
		2013	2018	2019	
1	Intra-Asia/Pasifik	133	194	199	+50%
2	Intra-Amerika Utara	110	124	127	+16%
3	Intra-Eropa	79.4	105	107	+35%
4	Eropa-Amerika Utara	43.2	53.7	56.1	+30%
5	Asia/Pasifik-Eropa	39.1	47.1	49.4	+26%
6	Asia/Pasifik-Amerika Utara	34.5	42.3	44.0	+27%
7	Asia/Pasifik-Timur Tengah	23.3	36.3	34.5	+40%
8	Intra-Amerika Latin/Caribbean	26.1	30.2	31.0	+18%
9	Eropa-Timur Tengah	17.0	27.0	27.2	+61%
10	Amerika Latin/Caribbean-Amerika Utara	20.3	24.0	23.9	+18%
11	Eropa-Amerika Latin/Caribbean	18.4	22.3	23.6	+28%
12	Afrika-Eropa	15.1	17.4	18.0	+20%
13	Timur Tengah-Amerika Utara	6.60	9.65	9.94	+51%
14	Intra-Afrika	7.72	9.03	9.37	+21%
15	Intra-Timur Tengah	7.24	9.71	9.18	+27%
16	Afrika-Timur Tengah	6.09	8.29	8.04	+32%
17	Afrika-Asia/Pasifik	2.68	2.91	2.72	+2%
18	Afrika-Amerika Utara	1.58	2.02	1.98	+25%
19	Asia/Pasifik-Amerika Latin/Caribbean	0.55	0.97	0.89	+60%
20	Amerika Latin/Caribbean-Timur Tengah	0.72	0.86	0.79	+9%
21	Afrika-Amerika Latin/Caribbean	0.36	0.49	0.48	+32%
Total		592	766	785	+33%

Sumber: (Graver et al., 2020)

Tabel 1 menunjukkan 21 grup rute penerbangan yang dibuat oleh ICAO. Kawasan Asia Pasifik merupakan penyumbang emisi CO₂ terbesar pada 2013, 2018, dan 2019 yaitu sebanyak 22% dari total global pada 2013, dan terus meningkat di 2018 dan 2019 menjadi 25%. Penerbangan Intra-Amerika Utara (misalnya, domestik AS, domestik Kanada, dan penerbangan

transborder) menyumbang 16% terhadap emisi CO₂ penumpang global pada 2019 dan menurun dari 2013 (19%). Sedangkan penerbangan di Eropa (dari maskapai Uni Eropa dan negara-negara non-UE) antara 2018 dan 2019 menghasilkan, lebih dari 100 Mt CO₂, atau 14% dari total global yang artinya mengalami peningkatan dari 2013 (13%) (Graver et al., 2020).

Tabel 2. Emisi CO₂ Penumpang Berdasarkan Negara Keberangkatan 2019

Rank	Negara Keberangkatan	CO (Mt)	% CO ₂ Total	RPK (milliar)	% Total RPK	Intensitas CO ₂ (g CO ₂ /RPK)
1	Amerika Serikat	179	23	1.890	22	95
2	China	103	13	1.167	13	88
3	Inggris Raya	31.8	4.1	365	4.2	87
4	Jepang	25.9	3.3	274	3.1	95
5	Jerman	23.1	2.9	253	2.9	91
6	Emirat Arab	21.5	2.7	243	2.8	89
7	India	21.2	2.7	248	2.9	85
8	Perancis	20.6	2.6	237	2.7	87
9	Spanyol	19.8	2.5	249	2.9	79
10	Australia	19.5	2.5	217	2.5	90
<i>Rest of the World</i>		319	41	3.567	41	89

Sumber: The International Council on Clean Transportation (Graver et al., 2020)

Laporan ICCT juga menunjukkan negara penyumbang emisi karbon terbesar dari angkutan penumpang berdasarkan keberangkatan pada 2019 adalah Amerika Serikat, disusul China dan Inggris Raya (UK). Ke 10 negara penyumbang emisi tertinggi tersebut secara keseluruhan bertanggung jawab atas hampir 60% dari emisi CO₂ dan

juga RPK dari penerbangan penumpang komersial. Penerbangan yang berangkat dari Amerika Serikat berkontribusi sebesar 22% terhadap RPK global dan 23% emisi karbon dari penerbangan penumpang global dan memiliki intensitas CO₂ rata-rata 6% lebih tinggi dari rata-rata global (Tabel 2).

Tabel 3. Emisi CO₂ Berdasarkan Kegiatan Operasi Penerbangan Internasional 2019 (10 Negara Peringkat Tertinggi)

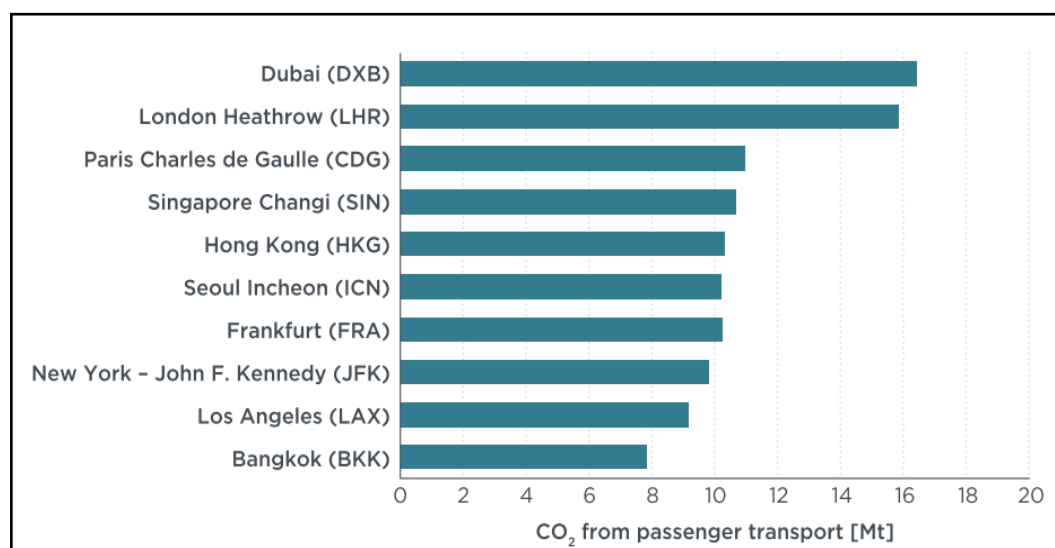
Rank	Negara Keberangkatan	CO (Mt)	% CO ₂ Total	RPK (milliar)	% Total RPK	Intensitas CO ₂ (g CO ₂ /RPK)
1	Amerika Serikat	61.9	7.9	668	7.7	93
2	China	34.5	4.4	397	4.6	87
3	Inggris Raya	30.3	3.9	353	4.1	86
4	Uni Emirat Arab	21.5	2.7	243	2.8	89
5	Jerman	21.4	2.7	240	2.8	89
6	Spanyol	16.7	2.1	217	2.5	77

7	Jepang	16.0	2.0	187	2.1	86
8	Perancis	15.9	2.0	183	2.1	87
9	Australia	12.5	1.6	145	1.7	86
10	Kanada	11.9	1.5	141	1.6	84

Sumber: The International Council on Clean Transportation (Graver *et al.*, 2020)

Tabel 3 memperlihatkan rata-rata emisi CO₂ penerbangan global adalah 90 gr per RPK. Sekitar 61% emisi CO₂ angkutan penumpang pada 2019 berasal dari penerbangan internasional. Ini adalah salah satu alasan dilakukannya upaya penyeimbangan dan pengurangan karbon yang difokuskan pada segmen pasar ini. Penerbangan internasional yang berangkat dari Amerika Serikat memancarkan CO₂ terbanyak dan menyumbang hampir 8% dari emisi CO₂ global dari penumpang transportasi

pada 2019. Namun, hanya 35% dari total emisi dari penerbangan penumpang yang berangkat Amerika Serikat berasal dari operasi internasional. Intensitas karbon rata-rata Penerbangan AS adalah yang tertinggi di antara 10 negara teratas dan 3% lebih tinggi dari rata-rata global, disusul oleh China dan Inggris Raya (UK). Bandara Internasional yang paling tinggi menyumbang emisi CO₂ pada 2019 ditunjukkan pada grafik di bawah ini:



Sumber: The International Council on Clean Transportation(Graver *et al.*, 2020)

Gambar 7. Bandar Udara Penyumbang Emisi CO₂ Terbesar di Dunia Sektor Internasional 2019

Tabel 4. 10 Bandara Dengan Lalu Lintas Penumpang Internasional Terpadat Di Dunia 2019

Peringkat	Nama Bandara	Lalu lintas Penumpang Internasional 2019
1	Dubai, Uni Emirat Arab (DXB)	86.328.896
2	London Heathrow, Inggris (LHR)	76.043.973
3	Amsterdam, Belanda (AMS)	71.679.691
4	Hongkong (HKG)	71.287.552
5	Incheon, Korea (ICN)	70.578.050
6	Paris Charles de Gaulle, Perancis (CDG)	69.823.084

7	Singapore (SIN)	67.601.000
8	Frankfurt, Jerman (FRA)	63.067.739
9	Bangkok, Thailand (BKK)	52.933.565
10	Taipei, Taiwan (TPE)	48.360.290

Sumber : (Airports Council International, 2020)

Bandara Dubai Uni Emirat Arab merupakan bandara penyumbang emisi CO₂ terbesar pada sektor penerbangan internasional (lihat tabel 4). Hal tersebut salah satunya disebabkan oleh lalu lintas penumpang internasional di bandara tersebut merupakan yang tertinggi di dunia, yaitu sebesar 86.328.896 penumpang pada 2019 (Tabel 2.5). Begitu juga dengan Bandara London Heathrow yang menempati urutan ke-2 sebagai penyumbang emisi CO₂ dan bandara terpadat ke-2 di dunia berdasarkan lalu lintas penumpang internasional. Namun tingkat emisi CO₂ di suatu bandara, tidak hanya ditentukan oleh lalu lintas penumpang internasionalnya saja. Beberapa faktor yang

mempengaruhi tingkat emisi CO₂ suatu bandara diantaranya, lalu lintas barang/kargo dan jumlah pergerakan pesawat. Bandara Amsterdam dan Taipei misalnya, meskipun masuk dalam 10 bandar dengan lalu lintas penumpang internasional terpadat, namun kedua bandara tersebut tidak masuk dalam 10 bandara penyumbang emisi CO₂ terbesar di dunia. Sebaliknya, Bandara John F. Kennedy dan Los Angeles Amerika Serikat yang tidak termasuk dalam peringkat 10 bandara dengan lalu lintas penumpang internasional terpadat di dunia, namun menempati urutan ke- 8 dan 9 sebagai penyumbang emisi CO₂ terbesar di dunia.

Tabel 5. Emisi CO₂ Berdasarkan Kegiatan Operasi Penerbangan Domestik 2019

Peringkat	Negara Keberangkatan	CO (Mt)	% Total CO ₂ Global	RPK (milliar)	% Total RPK Global	Intensitas CO ₂ (g CO ₂ /RPK)
1	Amerika Serikat	117	15	1.222	14	96
2	China	68.4	8.7	770	8.8	89
3	India	12.1	1.5	140	1.6	86
4	Federasi Rusia	10.2	1.3	113	1.3	90
5	Jepang	9.92	1.3	87.5	1.0	113
6	Brasil	9.49	1.2	96.4	1.1	98
7	Indonesia	8.08	1.0	81.7	0.9	99
8	Australia	7.05	0.9	72.2	0.8	98
9	Kanada	6.28	0.8	62.5	0.7	100
10	Mexico	5.51	0.7	57.5	0.7	96

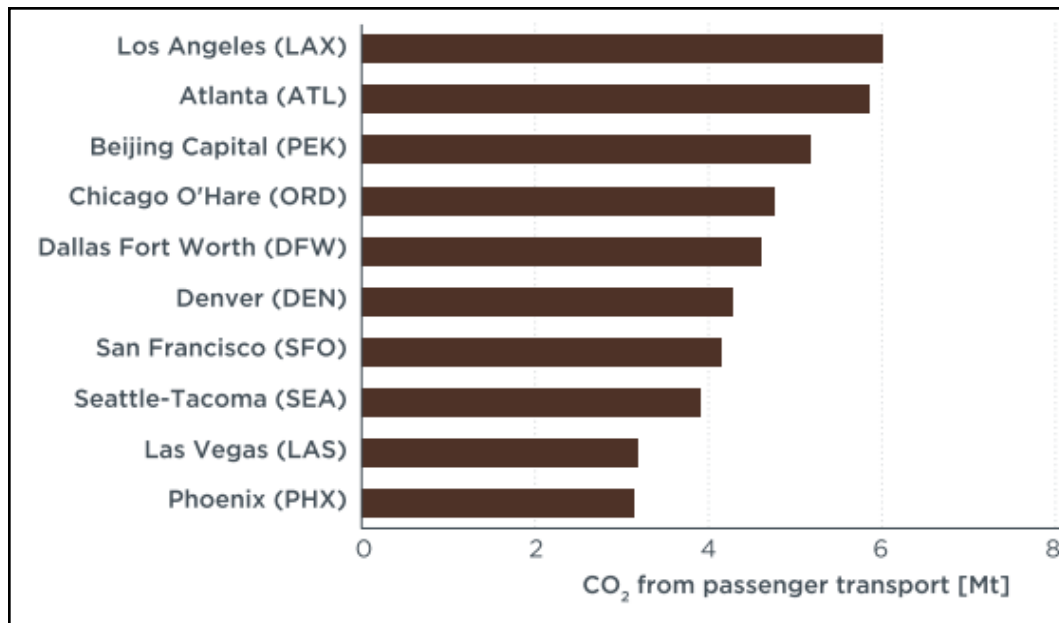
Sumber: The International Council on Clean Transportation (Graver *et al.*, 2020)

Amerika Serikat berada pada urutan pertama sebagai emiter terbesar pada sektor penerbangan domestik dengan kontribusi sebesar 117 Mt, yang berarti berkontribusi terhadap 15% dari total emisi global (2.5). China sebagaimana pada sektor penerbangan internasional, juga berada pada peringkat kedua sebagai penyumbang terbesar emisi

CO₂ di penerbangan domestik. Amerika Serikat dan China bertanggung jawab atas 185 CO₂ dari penerbangan domestik, atau lebih dari 60% emisi dari operasi domestik global pada 2019. Hal ini meningkat 31% sejak 2013 dan sedikit melampaui pertumbuhan rata-rata emisi lalu lintas domestik secara global, yaitu 29% antara

2013 dan 2019. Indonesia ternyata menempati urutan ke-7 sebagai emiter transportasi udara pada penerbangan domestik dengan kontribusi sebesar 8.08 Mt, yang berarti menyumbang 1% dari global emisi karbon dunia. Berikut adalah 10 bandara teratas di

mana CO₂ terbanyak emisi berasal dari operasional penumpang domestik. Sembilan bandara sebagai emiter terbesar berada di negara Amerika Serikat, sedangkan Bandara Internasional Beijing di China menempati posisi ketiga.



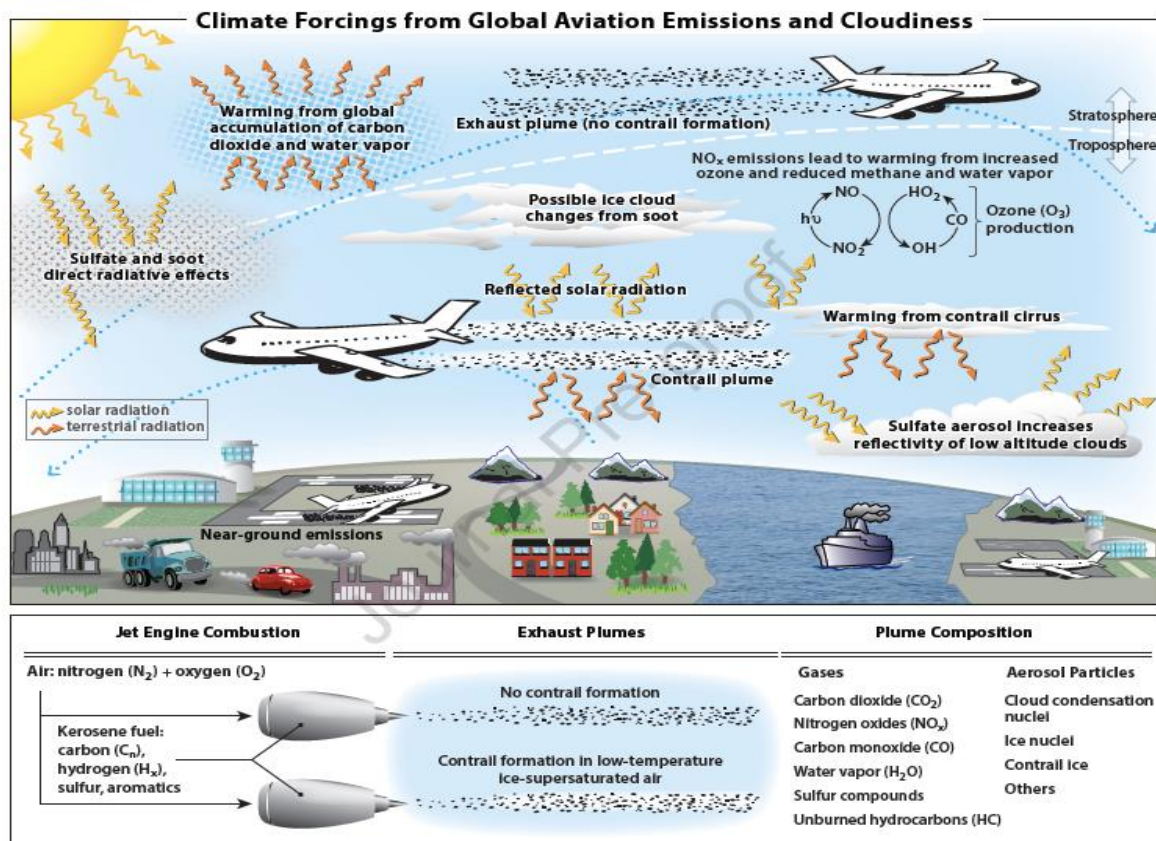
Gambar 8. Bandar Udara Penyumbang Emisi CO₂ Terbesar Di Dunia Sektor Domestik 2019

Sumber: The International Council for Clean Transportation (Graver *et al.*, 2020)

3. Dampak Industri Penerbangan Global terhadap Radiative Forcing (RF)

Efek emisi pesawat pada atmosfer bersifat kompleks karena adanya faktor ketinggian, geografi, dan cakrawala waktu, serta kondisi lingkungan yang berbeda. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa selain emisi CO₂ dari industri penerbangan, terdapat faktor-faktor lainnya yang dapat meningkatkan dampak perubahan iklim. Faktor-faktor ini termasuk kontribusi emisi pesawat untuk produksi ozon; pembentukan jalur kondensasi dan awan sirrus; emisi berbagai gas dan partikel, termasuk uap air, nitrous oksida, sulfat, dan partikulat dari pembakaran bahan bakar jet; serta lokasi ketinggian pesawat ketika menghasilkan sebagian besar emisi tersebut.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-UN) memperkirakan kontribusi sektor penerbangan terhadap perubahan iklim total dapat mencapai 2-4 kali lipat dari emisi CO₂ yang dihasilkan sebelumnya (Lattanzio, 2021). Operasi penerbangan global berkontribusi pada perubahan iklim antropogenik melalui serangkaian proses kompleks yang menyebabkan pemanasan permukaan bersih (*net surface warming*). Emisi penerbangan yang paling utama adalah karbon dioksida (CO₂), nitrogen oksida (NO_x), uap air, soot dan aerosol sulfat, dan peningkatan kekeruhan awan karena pembentukan kontrail (*contrail formation*) Proses tersebut oleh Lee *et al.* (D. S. Lee *et al.*, 2020) secara skematik digambarkan sebagai berikut :



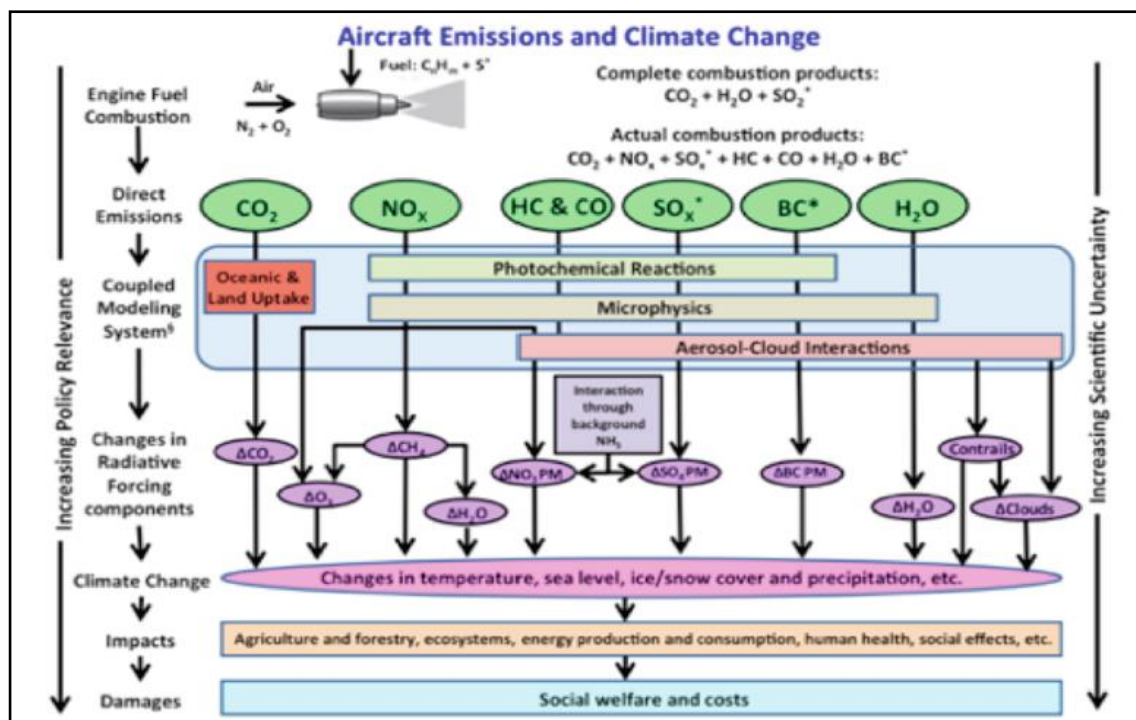
Sumber : Lee et al. (D. S. Lee *et al.*, 2020)

Gambar 9. *Climate Forcing From Global Aviation Emissions And Cloudiness*

Gambar 9 merupakan skema dari emisi penerbangan dan peningkatan awan cirrus memberikan dampak kepada sistem iklim. Kontribusi *Net Radiating Force/ RF* positif (pemanasan) berasal dari emisi CO_2 , uap air, NO_x , dan *soot emissions* serta dari *contrail cirrus* (terdiri dari *contrail linier* dan *kekeruhan cirrus* yang timbul darinya). Sedangkan kontribusi RF negatif (pendinginan) berasal dari produksi aerosol sulfat. Pemanasan bersih dari emisi NO_x adalah jumlah dari pemanasan (peningkatan ozon jangka pendek) dan pendinginan (penurunan metana dan uap air stratosfer, dan penurunan ozon jangka panjang). Pemanasan

bersih dari *contrail cirrus* adalah jumlah dari siklus siang / malam. Kontribusi ini melibatkan sejumlah besar proses kimiawi, mikrofisika, perpindahan (*transporting*), dan radiasi pada atmosfer global (Lee & *et al.*, 2020).

Hubungan antara emisi penerbangan, *Radiative Forcing (RF)*, perubahan iklim, serta dampak dan potensi kerusakannya juga ditunjukkan oleh (Fahey *et al.*, 2016) dalam diagram berikut yang diduga kuat menggambarkan proses perubahan iklim akibat kegiatan operasional penerbangan global.



Sumber : (Fahey *et al.*, 2016)

Gambar 10. Hubungan Emisi Penerbangan, *Radiative Forcing* dan Perubahan Iklim

Emisi langsung pesawat akan melalui berbagai transformasi kimia dan terakumulasi di atmosfer sehingga mengarah pada pemacaran radiatif (lihat Gambar 10). Gas rumah kaca yang utama (GRK) yang dipancarkan pesawat adalah karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O). Emisi nitrogen oksida (NO_x) juga dapat berdampak pada konsentrasi GRK lainnya, terutama ozon (O₃) dan metana (CH₄). Karbon hitam (jelaga) adalah aerosol yang dipancarkan secara langsung, dan oksida belerang (SO_x), NO_x, dan hidrokarbon (HC) menyebabkan produksi aerosol setelah terpancarnya emisi. Emisi uap air dalam kombinasi dengan aerosol yang dipancarkan menyebabkan pembentukan kontrail. Kontrail persisten yang terbentuk pada *ambient humidity* yang tinggi dan pada suhu rendah, telah meningkatkan kemendungan (*cloudiness*). Selain itu aerosol penerbangan dapat memodifikasi awan alami atau memicu pembentukan awan (Fahey *et al.*, 2016).

Gambar 10 juga menunjukkan dampak perubahan iklim seperti perubahan temperatur bumi, kenaikan level air laut, mencairnya es di kutub yang akan mempengaruhi pertanian, perhutanan, ekosistem, produksi dan

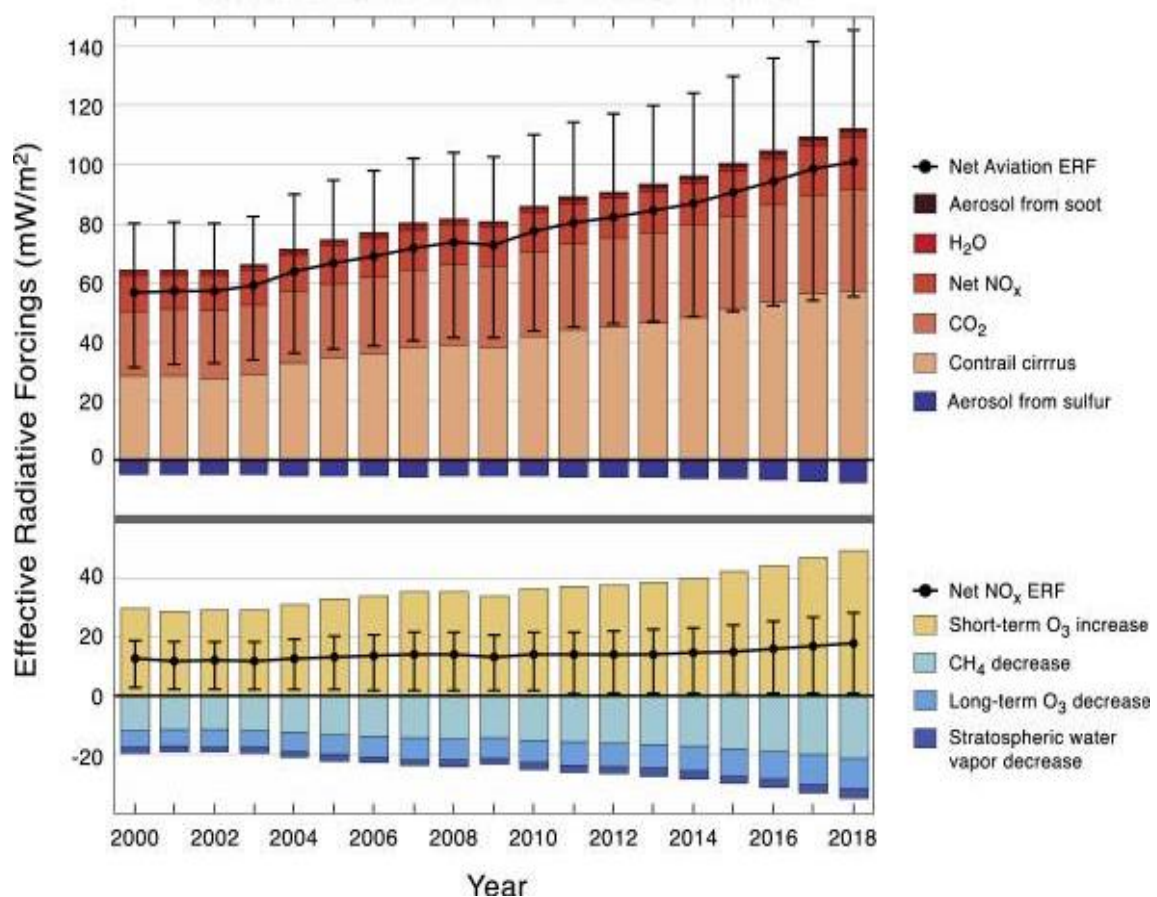
konsumsi energi, kesehatan manusia, serta dampak sosial lainnya. Pada akhirnya kerusakan yang mengancam manusia akibat perubahan iklim tersebut adalah kesejahteraan sosial dan beban biaya yang harus ditanggung. Laporan IPCC pada tahun 1995 menyimpulkan dampak emisi antropogenik pada perubahan iklim sebagai berikut : 1) Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca sejak zaman pra-industri (yaitu, sejak sekitar 1750) telah menyebabkan pemacaran iklim radiatif yang positif, cenderung menghangatkan permukaan Bumi dan menghasilkan perubahan iklim lainnya, 2) Konsentrasi atmosfer gas rumah kaca karbon dioksida, metana, dan nitrous oksida (N₂O), telah meningkat signifikan: masing-masing sekitar 30, 145, dan 15%, (nilai untuk 1992). Tren ini dapat dikaitkan sebagian besar dengan aktivitas manusia, sebagian besar penggunaan bahan bakar fosil, perubahan penggunaan lahan, dan pertanian;

Dampak lainnya dari antropogenik menurut IPCC, yaitu sebagian besar gas rumah kaca tetap di atmosfer untuk waktu yang lama (untuk CO₂ dan nitrous oksida, bertahan sampai berabad-abad). Aerosol troposferik yang dihasilkan dari pembakaran

bahan bakar fosil, pembakaran biomassa, dan sumber lain telah menyebabkan lapisan radiatif negatif, yang, sementara difokuskan di daerah tertentu dan daerah sub-continent, dapat memiliki efek kontinental terhadap hemisfer pada pola iklim. Berbeda dengan gas rumah kaca berumur panjang, aerosol antropogenik sangat berumur pendek di atmosfer; oleh karena itu, RF dapat menyesuaikan dengan cepat untuk meningkatkan atau mengurangi emisi. Perkiraan kenaikan suhu udara permukaan rata-rata global pada tahun 2100 relatif terhadap 1990 untuk skenario IS92 berkisar antara 1 hingga 3,5°C dan Permukaan laut rata-rata diperkirakan akan naik sebagai akibat dari perluasan termal lautan dan

pencairan gletser dan lapisan es. Perkiraan kenaikan permukaan laut sebesar 2100 relatif hingga 1990 untuk skenario IS92 berkisar antara 15 hingga 95 cm. Suhu yang lebih hangat pada akhirnya akan menyebabkan siklus hidrologis yang lebih kuat; sehingga berpotensi menyebabkan kekeringan parah dan/atau banjir di beberapa tempat dan kekeringan sedang dan/atau banjir di tempat lain. Beberapa model indikasi peningkatan intensitas curah hujan, menunjukkan kemungkinan terjadinya curah hujan yang lebih ekstrim (Penner, *et al.*, 1999).

Nilai ERF kuantitatif penerbangan global yang terkait dengan proses perubahan iklim akibat emisi dari sektor penerbangan ditunjukkan pada gambar berikut ini,



Sumber : (D. S. Lee et al., 2020)

Gambar 11. Effective Radiative Forcing (ERF) dari Penerbangan Global Tahun 2000-2018

Grafik pada Gambar 11 memperlihatkan berbagai emisi dari pesawat terbang dan dampaknya yang lebih luas antara tahun 2000 dan 2018 (Lee & Foster, 2020).

Batang berwarna merah dengan gradasi warna yang berbeda menunjukkan bahwa *contrail cirrus* dan CO₂ merupakan dua dampak pemanasan utama dari emisi pesawat, dengan

kontribusi yang lebih kecil dari NO_x dan jelaga (soot). Aerosol yang terbentuk dari belerang (batang berwarna biru) memiliki efek pendinginan yang kecil. Sedangkan garis berwarna hitam memperlihatkan dampak pemanasan keseluruhan penerbangan ketika semua efek tersebut diperhitungkan. Dampak pemanasan akibat penerbangan global mengalami peningkatan dari sekitar 56m W/m² pada tahun 2000 menjadi 101m W/m² pada tahun 2018.

Gas-gas emisi tersebut secara bersama-sama, mewakili sektor penerbangan global dengan berkontribusi sekitar 3,5% dari RF pada saat ini. Dengan demikian, meskipun industri penerbangan hanya menyumbang sekitar 2% dari emisi CO₂, namun dampaknya terhadap iklim jauh lebih besar. Bagan yang berada di bawah, menunjukkan dampak spesifik NO_x, termasuk pemanasan yang

disebabkan oleh peningkatan ozon jangka pendek (batang kuning), pendinginan (batang biru) yang disebabkan oleh penghancuran gas metana, penurunan ozon jangka panjang, dan pengurangan uap air pada lapisan stratosfer. Ketidakpastian dalam perkiraan dampak industri penerbangan pada perubahan iklim (ditunjukkan sebagai *error bars*) didominasi oleh emisi non-CO₂. Beberapa efek juga belum dapat diukur - termasuk interaksi aerosol-cloud dari emisi belerang dan jelaga - dan efek ini masih menjadi prioritas ilmiah (Lee & Foster, 2020).

Jenis-jenis emisi dan sumber emisi dari kegiatan operasional industri penerbangan yang berpengaruh terhadap perubahan iklim ditunjukkan dalam Tabel 6 yang dikeluarkan oleh US - *Federal Aviation Administration* (FAA).

Tabel 6. Jenis dan Sumber Emisi Dari Penerbangan

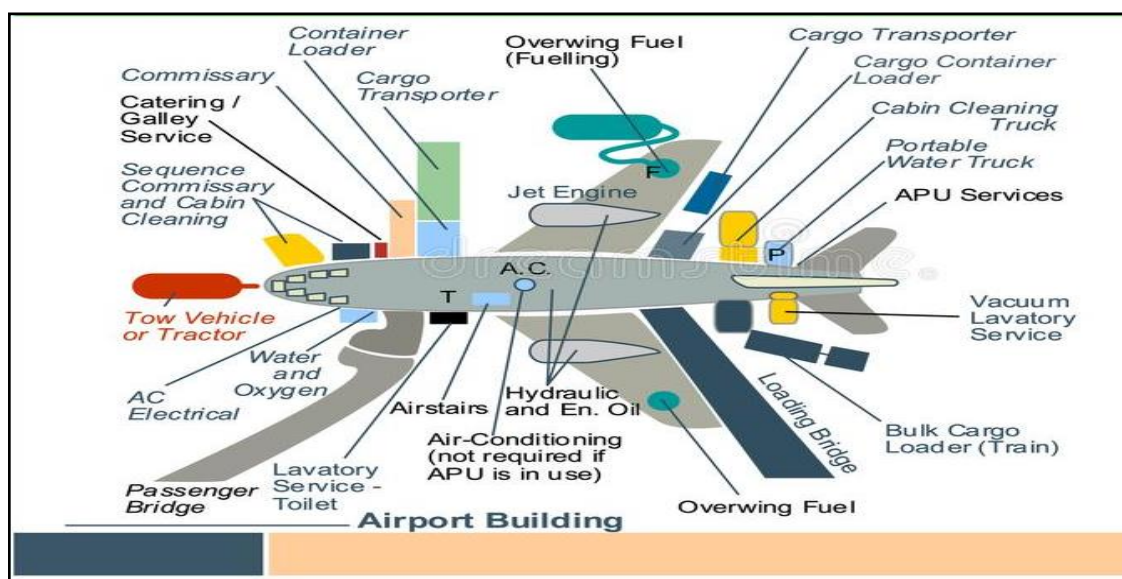
Jenis Emisi	Deskripsi	Sumber Emisi
CO ₂	Karbon dioksida adalah produk pembakaran lengkap bahan bakar hidrokarbon seperti bensin, bahan bakar jet, dan diesel. Karbon dalam bahan bakar dikombinasikan dengan oksigen di udara untuk menghasilkan CO ₂ .	- Pesawat - Auxiliary Power Unit (APU) - Ground Support Equipment (GSE) - Kendaraan - Stationary Power Plants - Construction Equipments
H ₂ O	Uap air (<i>water vapor</i>) adalah produk lain dari pembakaran lengkap sebagai hidrogen dalam bahan bakar dikombinasikan dengan oksigen di udara untuk menghasilkan H ₂ O. Ini adalah sumber air di jalur kondensasi (contrails)	- Pesawat - Auxiliary Power Unit (APU) - Ground Support Equipment (GSE) - Kendaraan - Stationary Power Plants - Construction Equipments
NO _x	Nitrogen oksida diproduksi ketika udara melewati suhu tinggi / tekanan tinggi pembakaran dan nitrogen dan oksigen hadir di udara yang bergabung untuk membentuk NO _x . Berkontribusi pada ozon	- Pesawat - Auxiliary Power Unit (APU) - Ground Support Equipment (GSE)

	dan pembentukan materi partikulat sekunder.	- Kendaraan - <i>Stationary Power Plants</i> - <i>Construction Equipment</i>
SO _x	Sulfur oksida diproduksi ketika sejumlah kecil belerang- yang pada dasarnya terdapat pada semua bahan bakar minyak bumi- lalu bergabung dengan oksigen dari udara selama pembakaran. Berkontribusi pada pembentukan materi partikulat sekunder.	- Pesawat - Auxiliary Power Unit (APU) - <i>Ground Support Equipment (GSE)</i> - <i>Construction Equipment</i>
<i>Particulate Matter (non-volatile)</i>	Partikel kecil dari jelaga/soot (alias karbon hitam) yang terbentuk sebagai akibat dari pembakaran dan aerosol yang tidak lengkap gas kondensasi, yang ukurannya cukup kecil untuk dapat dihirup.	- Pesawat - Auxiliary Power Unit (APU) - <i>Ground Support Equipment (GSE)</i> - Kendaraan - <i>Stationary Power Plants</i> - <i>Construction Equipment</i>

Sumber : (FAA Office of Environment and Energy, 2015)

Sumber utama dari emisi kegiatan operasional industri penerbangan bukan hanya dari pengoperasian pesawat terbang, namun juga sumber lainnya yang terjadi ketika pesawat masih berada di airport seperti *Auxiliary Power Unit (APU)*, *Ground*

Support Equipment (GSE), kendaraan-khusus yang membantu kegiatan operasional pesawat di airport, *Stationary Power Plants* dan *Construction Equipment* seperti terlihat pada gambar di bawah ini :



Sumber : (Ground Support Equipment and Supplies on Airport, 2020)
Gambar 12. Aircraft Ground Support Equipment and Supplies On Airport

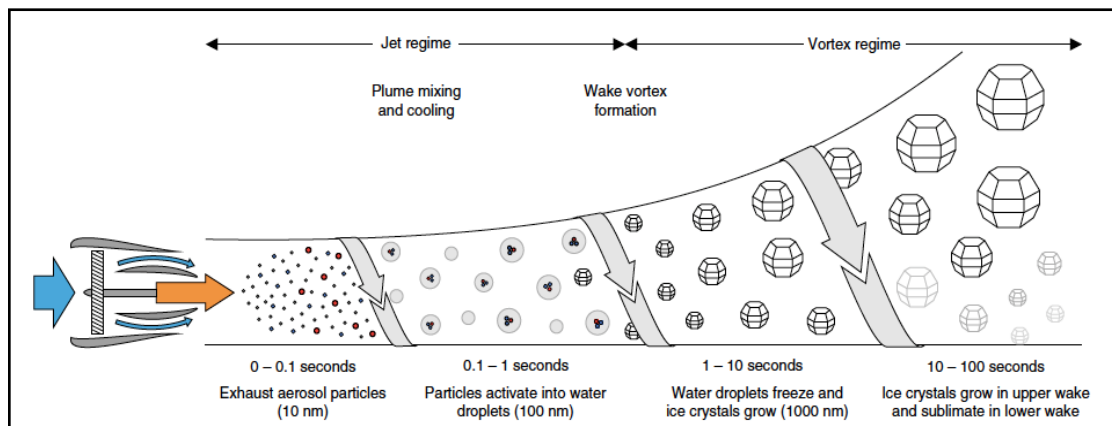
Gambar 12 memperlihatkan aktivitas ground handling yaitu *ramp operations* setelah pesawat mendarat atau sebelum pesawat *take-off*. Selain emisi pesawat, sumber emisi lainnya dari aktivitas ramp operation di atas bersumber dari Auxiliary Power Unit (APU) *Ground Support Equipment* (GSE), *vehicles*, dan *Stationary Power Plants*. Oleh karena itu, mitigasi emisi pada industri penerbangan bukan hanya terhadap pesawat ketika berada di udara, namun operasi darat di airport juga memerlukan mitigasi yang efektif karena berdampak signifikan terhadap kontribusi emisi industri penerbangan secara agregat.

4. Pengaruh *Aircraft-Induced Clouds* (AIC) terhadap Perubahan Iklim

Lalu lintas udara dikenal memiliki efek yang langsung dan dapat diketahui terhadap awan di troposfer. Awan baru yang terbentuk dari limbah pesawat disebut *contrails* dan akan terus berkembang menjadi *contrail cirrus* yang persisten dan menyebar (Tesche, Achtert, Glantz, & Noone, 2016). Industri penerbangan memiliki peluang unik untuk menghentikan kontribusi global *radiative forcing* (RF) dengan meminimalkan penggunaan generasi pesawat yang dapat menginduksi awan (*Aircraft Induced Clouds*). Jejak kondensasi antropogenik (buatan manusia) ini menciptakan efek rumah kaca dengan menyerap atau mengarahkan kembali ke Bumi sekitar 33% dari radiasi gelombang panjang termal keluar yang dipancarkan. Efek AIC menyumbang 2% dari total RF antropogenik Bumi. Efek mengurangi AIC pada memiliki efek langsung pada pemanasan global, tidak seperti pengurangan emisi CO₂ yang dampaknya terhadap pemanasan global baru dapat dirasakan setelah 2 dekade (Sherry

& Thompson, 2020). Keseimbangan radiasi antropogenik Bumi total adalah sekitar -2.29W/m^2 dan kontribusi sektor penerbangan diperkirakan sekitar 3,9% ($-0,09\text{W/m}^2$). Dalam sektor penerbangan, *Aircraft-Induced Clouds* (AIC) menyumbang sekitar 55% ($0,050\text{W/m}^2$) terhadap pemanasan global, 39% ($0,035\text{W/m}^2$) dari CO₂, dan 6% ($0,05\text{W/m}^2$) dari NO_x. Hal ini bertentangan dengan pendapat populer yang mengatakan bahwa CO₂ adalah sumber utama pemanasan global dari kegiatan penerbangan (Sherry & Thompson, 2020).

Menurut (Kärcher, 2018), jalur kondensasi (*contrails*) adalah awan es berbentuk garis yang dihasilkan oleh jelajah pesawat jet di troposfer level atas pada ketinggian 8–13 km. *Contrails* dapat berada pada atmosfer dalam jangka waktu yang beragam, ada yang bertahan lama dan ada yang tidak tergantung pada kondisi sekitarnya. *Contrails* yang dikategorikan berumur panjang adalah bertahan setidaknya selama 10 menit yang didefinisikan oleh *World Meteorological Organization* sebagai *Cirrus homogenitus* dan merupakan satu-satunya jenis awan es buatan manusia. *Cirrus homogenitus* dikategorikan juga sebagai *persistent contrails* dan *contrail cirrus* - tergantung pada apakah atau tidak mereka mempertahankan bentuk linier mereka- yang masing-masing atau gabungan keduanya dikenal sebagai *aircraft-induced clouds* (AIC). Perubahan *cloudiness* global karena AIC dapat menciptakan ketidakseimbangan antara radiasi insiden dari Matahari dan *upwelling radiation* dari permukaan dan atmosfer Bumi yang berdampak pada *Climate Radiative Forcing* (RF) yang menginduksi kecenderungan untuk mengubah struktur suhu di atmosfer level bawah.



Sumber : (Kärcher, 2018)

Gambar 13. Proses Mempengaruhi Tahapan Formasi *Contrail*

Exhaust plumes yang diproduksi dengan pembakaran campuran bahan bakar-udara pada suhu dan tekanan tinggi dalam mesin jet turbofan, mengandung bahan gas dan partikulat. Faktor-faktor yang mempengaruhi perkembangan awan yang diinduksi pesawat (AIC). Cakupan awan yang diinduksi bertambah luas karena pergeseran vertikal dari komponen angin horizontal. Pencampuran turbulent (*entrainment*) menyebabkan konsentrasi kristal es semakin berkurang dari waktu ke waktu. Ukuran kristal es juga bertambah besar dengan penyerapan (pengendapan) uap air dari lapisan tak jenuh es (*ice-supersaturated layers*). Pertumbuhan deposisi yang berkelanjutan menyebabkan bentuk kristal es (*habits*) menyimpang dari isometri awal. Bentuk kristal es yang kurang dikenal dan diilustrasikan sebagai droxtals, prisma dan kolom heksagonal, bullet rosettes and aggregates, akan mempengaruhi *size-dependent growth, fall rates and optical properties* (Kärcher, 2018).

Jalur kondensasi (kontrail) dan *cirrus* yang diinduksi pesawat saat ini menjadi fenomena umum di langit lintang tengah. Penelitian Mannstein & Schumann mengungkapkan bahwa jumlah *cirrus* tambahan yang diinduksi dari penyebaran kontrail di udara lembab diperkirakan dari korelasi langsung antara penutup *cirrus* yang diamati berasal data METEOSAT dan kepadatan penerbangan penerbangan yang dilaporkan oleh EUROCONTROL pada resolusi spasial dan temporal tinggi dari 22

Juni hingga 27 Juli 1998 dan 27 September hingga 21 Oktober 2000. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pesawat yang diinduksi *cirrus* menutupi Eropa sekitar sepuluh kali lebih besar daripada kontrail linier di wilayah yang sama. Daya RF dari *cirrus* tambahan mungkin 0 kali lebih tinggi daripada kontrail linier dan peningkatan CO₂ yang diinduksi penerbangan (Mannstein & Schumann, 2005).

Seperti halnya untuk awan yang terbentuk secara alami, dampak AIC berpengaruh pada keseimbangan radiasi alami Bumi. Seperti awan *cirrus* yang tinggi, *contrails* bersifat sangat transparan untuk menerima radiasi gelombang pendek "solar" (SW) dari Matahari (77%) yang hanya mencerminkan 23% kembali ke luar angkasa. Awan tersebut juga kembali ke Bumi 33% dari radiasi "termal" gelombang panjang yang dipancarkan keluar (ILW). AIC menghasilkan jaring ketidakseimbangan 10% pada siang hari, dan 33% pada malam hari. Ketidakseimbangan ini mempengaruhi struktur suhu di atmosfer yang lebih rendah dan berkontribusi pada pemanasan global. (Sherry & Thompson, 2020)

Keseimbangan radiasi antropogenik Bumi total adalah sekitar -2.29W/m^2 dan kontribusi sektor penerbangan diperkirakan sekitar 3,9% ($-0,09\text{W/m}^2$ dari total. Dalam kontribusi penerbangan, 55% ($0,050\text{W/m}^2$) kontribusi terhadap pemanasan global tersebut berasal dari AIC, 39% ($0,035\text{W/m}^2$) dari CO₂, dan 6% ($0,05\text{W/m}^2$) dari NO_x. Hal ini bertentangan dengan pendapat

populer yang mengatakan bahwa CO₂ adalah sumber utama pemanasan global dari kegiatan penerbangan. Sedangkan efek CO₂ dan gas rumah kaca lainnya pada struktur suhu atmosfer bawah membutuhkan sekitar 20 tahun sejak tanggal dipancarkan, efek AIC segera. Karena ini, mitigasi efek AIC terhadap pemanasan global dapat memperlambat pemanasan dan dapat mengulur waktu untuk inisiatif CO₂ jangka panjang untuk berlaku.

5. Mitigasi Dampak Perubahan Iklim pada Sektor Penerbangan

Pertumbuhan *Revenue Passenger Kilometer* (RPK) pada penerbangan internasional sejak 2010 terus mengalami peningkatan signifikan. Menurut statistik ICAO pada awal tahun 2019, jumlah total penumpang yang dibawa pada penerbangan berjadwal mengalami peningkatan naik menjadi 4,5 miliar pada tahun 2019, yang 3,6 persen lebih tinggi dari tahun sebelumnya. Sementara itu, jumlah keberangkatan mencapai 38,3 juta pada tahun 2019, yang berarti terjadi pertumbuhan sebanyak 1,7 persen. Pertumbuhan dramatis dalam industri penerbangan global di masa mendatang merupakan tantangan berat bagi industri penerbangan yang berkelanjutan terkait isu lingkungan. Menurut Hasan, pertumbuhan transportasi udara di dunia merupakan salah satu hambatan utama untuk mengurangi emisi GRK dari sektor ini (Hasan et al., 2021). Selain itu, adanya keterbatasan dalam memahami dampak penerbangan pada perubahan iklim telah menyebabkan pilihan teknologi, kegiatan operasional dan kebijakan yang tepat untuk mitigasi pada industri penerbangan menjadi tidak pasti. Akhirnya, mitigasi yang diupayakan selama ini oleh industri penerbangan lebih fokus pada pengurangan pembakaran bahan bakar pesawat (*fuel burn*) (Waitz et al., 2004).

IPCC sendiri mengakui memiliki keterbatasan dalam mengukur pengaruh aktivitas manusia terhadap iklim global yang disebabkan oleh tanda-tanda yang diharapkan masih muncul dari kebisingan variabilitas alami (the noise of natural variability) dan

juga karena adanya ketidakpastian dalam faktor-faktor utamanya. Hal ini termasuk besarnya dan pola variabilitas alami dalam jangka panjang dan pola *radiative forcing* yang terus berevolusi dari waktu ke waktu, serta respon terhadap perubahan konsentrasi GRK dan aerosol dan perubahan permukaan tanah. Namun demikian, berbagai bukti empiris yang saling mendukung menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan dari aktivitas penerbangan pada perubahan iklim global (Penner et al., 1999).

Menurut Bosch, apabila sektor penerbangan ingin berkontribusi dalam mengurangi dampak perubahan iklim, mereka harus mampu menghasilkan kebijakan internasional untuk mengurangi emisi CO₂ yang spesifik per kilometer-penumpang. Pada jangka pendek dan dengan pilihan terbatas, penggunaan pesawat komersial modern dapat dilakukan untuk mengurangi emisi, karena ruang lingkup peningkatan efisiensi mesin pesawat modern sudah memiliki teknologi yang matang. Meskipun demikian, untuk jangka panjang, upaya ini dinilai kurang efektif karena masa pakai pesawat modern pada umumnya adalah 25 tahun atau lebih, sehingga peningkatan pergantian armada global tentunya sangat lambat (Bosch, De Jong, Hoefnagels, & Slade, 2017:2).

Sgouridis, Bonnefoy, & Hansman et al., (2011), berpendapat bahwa pengurangan emisi CO₂ dari sektor penerbangan dapat dicapai melalui lima cara utama : 1) Peningkatan efisiensi teknologi yang berkaitan dengan kinerja efisiensi bahan bakar pesawat terbang; 2) Peningkatan efisiensi kegiatan operasional, termasuk efek operasi maskapai (misalnya pengurangan berat badan pesawat dengan peralatan onboard yang tidak perlu) dan operasi *Air Traffic Control*, (misalnya dengan penggunaan jalur penerbangan yang mengoptimalkan bahan bakar dan ketinggian, serta mengurangi keterlambatan ATC, dll); 3) Penggunaan bahan bakar alternatif yaitu bahan bakar yang memiliki kandungan emisi CO₂ yang lebih rendah daripada bahan bakar jet tradisional, 4) Pergeseran permintaan dengan memperhitungkan perubahan

travelers' mode choice behavior atau pengurangan permintaan melalui aktivitas alternatif tanpa berpergian (misalnya konferensi melalui video, rapat virtual, dll.); 5) Harga karbon (yaitu insentif berbasis pasar) yang digunakan sebagai mekanisme untuk meningkatkan harga efektif dari bahan bakar dan mengurangi permintaan melalui hubungan elastisitas permintaan harga. Namun *carbon trading* yang akan diterapkan dalam sektor penerbangan global sebagai salah satu strategi mitigasi, menjadi isu vital yang mendapatkan berbagai kritikan baik dari ahli maupun aktivis lingkungan. Menurut Sovacool (2011: 684-690), terdapat 4 (empat) problem mendasar dari *carbon trading*, yaitu : problem homogenitas, problem keadilan, problem permainan (*gaming*), dan problem informasi, di antaranya termasuk biaya transaksi serta kapasitas kelembagaan yang memberikan persetujuan dan auditor kredit dan proyek.

Strategi mitigasi yang direkomendasikan oleh (Sherry & Thompson, 2020) untuk mengurangi dampak AIC (*Aircraft -Induced Clouds*) dapat dibedakan

menjadi dua kategori berdasarkan biaya dan jangka waktunya. Mitigasi jangka pendek dan berbiaya rendah diantaranya melakukan perubahan operasional pada lintasan pesawat dan adaptasi bahan bakar mesin jet. Sedangkan strategi jangka panjang yang memerlukan investasi yang signifikan dalam kapasitas produksi yaitu; 1) membuat bahan bakar biofuel dan sintetis yang layak; 2) modifikasi pada mesin jet dan sumber bahan bakar alternatif (misalnya, LH2 dan LNG) yang tentunya membutuhkan pembaruan armada, biaya yang mahal, dan memakan waktu beberapa dekade. Oleh karena itu, setiap upaya mitigasi harus mempertimbangkan tingkat ketidakpastian dalam perkiraan ilmiah dampak AIC pada RF dan dampak RF pada struktur suhu Bumi.

Hasan et al. (Hasan et al., 2021), merekomendasikan kebijakan mitigasi yang harus dilakukan sektor penerbangan agar dapat mencapai target pengurangan emisi penerbangan pada tahun 2040 yang diadopsi dari laporan *Transportation and Environment* dalam tabel berikut ini :

Tabel 7. *Roadmap* Mitigasi untuk Mencapai Target Pengurangan Emisi Penerbangan Pada 2050

Ukuran	Rekomendasi Kebijakan	Asumsi	Hasil Yang Diharapkan
Efisiensi Armada Pesawat	Mengembangkan efisiensi armada pesawat terbang sebesar 0,5% per tahun di atas efisiensi bahan bakar pesawat saat ini yaitu 1% per tahun.	Tidak akan ada <i>rebound effect</i> (misalnya efisiensi bahan bakar kemungkinan akan mengurangi harga tiket sehingga penumpang akan melakukan lebih banyak perjalanan)	Sekitar 6.3% dari target pengurangan emisi pada tahun 2050 diharapkan dapat tercapai.
Pesawat Gen II dimulai 2040	1% permintaan perjalanan udara telah dapat menggunakan Pesawat Gen II pada tahun 2050	Pesawat Gen II diharapkan dapat mulai dioperasikan secara massif pada tahun 2040 dan 30% lebih efisien dari pada pesawat yang konvensional.	Diharapkan dapat menyumbang sebesar 12% dari target pengurangan emisi pada tahun 2050
Harga Karbon	Memperkenalkan harga karbon yang	Akan disesuaikan dengan elastisitas harga dan	Sekitar 12% dari target

		mahal yaitu 190/tCO ₂ pada tahun 2050	diasumsikan akan berkurang -0,48. Hal ini mengindikasikan bahwa 10% peningkatan harga akan mengurangi permintaan sebesar 4.8%	pengurangan emisi pada tahun 2050 diharapkan tercapai.
Penggunaan Biofuel	Meningkatkan porsi biofuel dalam <i>the aviation energy mix</i> menjadi 11,4% pada tahun 2050.		Biofuel akan dihasilkan dari general waste dan residues, dan bukan dari tanaman.	Diharapkan apat menyumbang sebesar 11% dari target pengurangan emisi pada tahun 2050
<i>Renewable power to liquid</i> (PtL)	Meningkatkan porsi PtL dalam <i>the aviation energy mix</i> menjadi 44% pada tahun 2050.		Sumber utama dari PtL dapat diperbaharui dan PtL diharapkan menjadi 66% lebih efisien dari pada bahan bakar pesawat yang biasa	Diharapkan dapat mencapai 66,5% dari pengurangan emisi yang dibutuhkan pada tahun 2050

Sumber : (Hasan *et al.*, 2021).

Penelitian Kharina, et al. menemukan bahwa manfaat finansial dari pembelian pesawat modern diperkirakan 3 kali lipat dari biayanya selama periode kepemilikan 17 tahun. Manfaat tersebut melebihi biaya melalui penghematan bahan bakar dan juga memiliki persyaratan pemeliharaan yang lebih rendah. Mereka mencatat bahwa maskapai AS dapat menghemat 200 juta ton setara minyak (Mtoe) dengan efisiensi bahan bakar armada sebesar 19%, yang berarti dapat menurunkan harga tiket untuk jarak pendek hingga USD 20, sedangkan untuk penerbangan jarak jauh internasional sebesar USD 105. . Manfaat pengurangan emisi dari mitigasi efisiensi pesawat bisa mencapai sekitar 630 MtCO₂ (Hasan *et al.*, 2021).

Pesawat generasi II masih dalam tahap pengembangan dan membutuhkan teknologi evolusioner di bidang aerodinamika, propulsi, sistem peralatan pesawat terbang, struktur, dan bahan agar dapat menghasilkan manfaat terhadap pengurangan emisi. Pengerahan skala besar pesawat Gen II diperkirakan akan terjadi setelah tahun 2040. Pesawat generasi II diasumsikan 30% lebih hemat bahan bakar dibandingkan dengan pesawat yang ada saat

ini, sedangkan target peningkatan efisiensi bahan bakar tahunan pesawat Gen II diharapkan mencapai 1,5%, sehingga akan memberikan manfaat pengurangan emisi sebesar 4,2% atau sekitar 63 MtCO₂ (Hasan *et al.*, 2021).

Dalam jalur mitigasi 2050, diasumsikan bahwa 12% dari total pengurangan emisi (yaitu, 180 MtCO₂ emisi) dapat dicapai dengan memberikan harga yang tinggi pada karbon. Dengan menentukan perkiraan biaya sosial karbon sebesar USD 190 per ton emisi CO₂ pada tahun 2050, maka biaya pengurangan 180 MtCO₂ adalah sebesar USD 34 miliar. (Hasan *et al.*, 2021). Sedangkan kontribusi biofuel pada jalur mitigasi 2050 diperkirakan sebesar 11%. Ini berarti sekitar 165 MtCO₂ emisi akan berkurang dengan meningkatkan penyerapan biofuel di industri penerbangan. Limbah bisa menjadi sumber utama biofuel bersama dengan pilihan non-tumbuhan lainnya seperti biofuel generasi ketiga (dari ganggang) atau biofuel generasi keempat (dari ganggang yang dimodifikasi secara genetik). Dalam hal biaya pengurangan emisi melalui biofuel, Hong, *et al.*, [106] memprediksi bahwa biaya pengurangan emisi

untuk tahun 2050 melalui biofuel sekitar USD 300 per ton emisi CO₂. Namun demikian harga biofuel diasumsikan dua kali dari minyak tanah jet, meskipun harga biofuel dapat bervariasi tergantung harga bahan baku (ganggang, limbah, tanaman), lokasi geografis, biaya tenaga kerja dan lahan, subsidi pertanian, dan harga minyak. (Hasan *et al.*, 2021).

Peran Power to Liquid (PTL) dalam mencapai target pengurangan emisi di masa depan adalah krusial karena sekitar 66,6% dari target pengurangan emisi akan dicapai melalui PTL. Contoh PTL dapat menjadi elektrofuel drop-in, di mana hidrogen (diproduksi dari elektrolisis) akan dikombinasikan dengan CO₂ (ditangkap dari atmosfer) untuk menghasilkan bahan bakar elektrofuel atau hidrokarbon drop-in. Salah satu keunggulan PTL adalah minimal atau tidak membutuhkan modifikasi pada pesawat, mesin, dan infrastruktur pengisian bahan bakar ulang di darat (*ground refueling infrastructure*). (Hasan *et al.*, 2021).

Semua strategi di atas tentunya tidak akan efektif apabila tidak dikuatkan dengan upaya untuk mengurangi lalu-lintas udara, karena menurut Norgaard (2006), teknologi baru muncul lebih cepat daripada perkembangan kemampuan organisasi dalam mengendalikan efek samping sosial dan lingkungan dari teknologi tersebut. Merancang jenis polutan baru jauh lebih cepat daripada mengembangkan institusi untuk mengontrolnya. Norgaard memberi contoh bahwa banyak negara yang saat ini memiliki keahlian untuk mengembangkan senjata nuklir, kimia, dan biologi, namun tidak jelas apakah mereka telah mampu merancang lembaga untuk mengurangi kemungkinan perang atau tidak. Begitu pula penelitian (Cafaro, 2013) menyimpulkan bahwa lalu-lintas udara, baik penumpang maupun barang, ternyata meningkat jauh lebih cepat dari pada peningkatan efisiensi.

D. Simpulan

Pertumbuhan *Revenue Passenger Kilometer* (RPK) pada penerbangan internasional sejak 2010 terus mengalami

peningkatan signifikan dan tentunya berdampak langsung terhadap kenaikan emisi karbon dari sektor penerbangan. Industri penerbangan global (termasuk domestik dan internasional; baik penumpang dan kargo) diperkirakan berkontribusi terhadap perubahan iklim melalui 1,9% emisi gas rumah kaca (yang mencakup semua gas rumah kaca) dan 2,5% emisi CO₂, serta 3,5% dari “*Effective Radiative Forcing*” (ERF). Pengurangan emisi CO₂ dari sektor penerbangan di antaranya: 1) Peningkatan efisiensi teknologi yang berkaitan dengan kinerja efisiensi bahan bakar pesawat terbang; 2) Peningkatan efisiensi kegiatan operasional, 3) Penggunaan bahan bakar alternatif yaitu bahan bakar yang memiliki kandungan emisi CO₂ yang lebih rendah daripada bahan bakar jet tradisional, 4) Pergeseran permintaan dengan memperhitungkan perubahan perilaku perjalanan, 5) Harga karbon (yaitu insentif berbasis pasar) yang digunakan sebagai mekanisme untuk meningkatkan harga efektif dari bahan bakar dan mengurangi permintaan melalui hubungan elastisitas permintaan harga. Sedangkan strategi mitigasi untuk mengurangi dampak AIC (*Aircraft -Induced Clouds*) dalam jangka pendek dan berbiaya rendah dapat dilakukan dengan perubahan operasional pada lintasan pesawat dan adaptasi bahan bakar mesin jet. Pada masa yang akan datang, upaya mitigasi yang bersifat konvensional pada sektor penerbangan diperkirakan tak akan mampu mengatasi efek perubahan iklim *climate change* apabila tidak ada upaya yang lebih fundamental dengan mengubah paradigma para *stakeholders* karena lalu-lintas udara ternyata meningkat jauh lebih cepat dari pada peningkatan efisiensi itu sendiri.

E. Daftar Pustaka

Airports Council International. (2020). *ACI reveals top 20 airports for passenger traffic, cargo, and aircraft movements*. Press Release. <https://aci.aero/news/2020/05/19/aci-reveals-top-20-airports-for-passenger-traffic-cargo-and-aircraft-movements/>

- Bickel, M., Ponater, M., Bock, L., Burkhardt, U., & Reineke, S. (2020). Estimating the effective radiative forcing of contrail cirrus. *Journal of Climate*, 33(5), 1991–2005. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0467.1>
- Boeing. (2019). *Commercial Market Outlook 2019 - 2038*.
- Cafaro, P. (2013). Reducing consumption to avert catastrophic global climate change: The case of aviation. *Natural Science*, 05(01), 99–105. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.51a016>
- Chen, C. C., & Gettelman, A. (2016). Simulated 2050 aviation radiative forcing from contrails and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(11), 7317–7333. <https://doi.org/10.5194/acp-16-7317-2016>
- FAA Office of Environment and Energy. (2015). *Aviation Emission, Impacts & Mitigation : A Primer* (Issue January).
- Fahey, D. W., Baughcum, S. L., Fuglestvedt, J. S., Gupta, M. L., Lee, D. S., Sausen, R., & Velthoven, P. F. J. van. (2016). White Paper on Climate Change: Aviation Impacts on Climate State of Science. In *ICAO Environmental Report*.
- Graver, B., Rutherford, D. A. N., & Zheng, S. (2020). *CO₂ Emissions From Commercial Aviation (2013, 2018, and 2019)* (Issue October). The International Council on Clean Transportation.
- Ground Support Equipment and Supplies on Airport*. (2020). <https://www.dreamstime.com/aircraft-ground-support-equipment-supplies-airport-service-requirements-airliner-orchestrate-ramp-operations-punctual-image107642868>
- Hasan, M. A., Mamun, A. Al, Rahman, S. M., Malik, K., Al Amran, M. I. U., Khondaker, A. N., Reshi, O., Tiwari, S. P., & Alismail, F. S. (2021). Climate change mitigation pathways for the aviation sector. *Sustainability*, 13(7), 1–29. <https://doi.org/10.3390/su13073656>
- International Air Transport Association (IATA). (2019). *Air Passenger Market Analysis* (Issue December).
- International Civil Aviation Organisation (ICAO). (2019). *Presentation of 2019 Air Transport Statistical Results*.
- International Civil Aviation Organization. (2019). *The World of Air Transport in 2019*.
- Kärcher, B. (2018). Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications*, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0>
- Lattanzio, R. K. (2021). Aviation and Climate Change. In *Aviation and Climate Change*. <https://doi.org/10.4324/9780203891896>
- Lee, D. S., & et al. (2020). *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7468346/>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Lee, D. S., & Foster, P. (2020). *Calculating the true climate impact of aviation emissions*. [calculating-the-true-climate-impact-of-aviation-emissions](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834)
- Mannstein, H., & Schumann, U. (2005). Aircraft induced contrail cirrus over Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(4), 549–554. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0058>
- Norgaard, R. B. (2006). *Development Betrayed: The End of Progress and a Coevolutionary Revisioning of The Future*. Taylor & Francis e-Library.

- Overton, J. (2019). Fact Sheet: The Growth in Greenhouse Gas Emissions from Commercial Aviation. *Environmental and Energy Study Institute, October*, 1–10.
- Penner, J. E., Lister, D. H., Griggs, D. J., Dokken, D. J., & McFarland, M. (1999). *IPCC Special Report : Aviation and The Global Atmosphere*.
- Ritchie, H. (2020). *Climate change and flying: what share of global CO₂ emissions come from aviation?* <https://ourworldindata.org/CO2-emissions-from-aviation>
- Sgouridis, S., Bonnefoy, P. A., & Hansman, R. J. (2011). Air transportation in a carbon constrained world: Long-term dynamics of policies and strategies for mitigating the carbon footprint of commercial aviation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(10), 1077–1091.
- <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.019>
- Sherry, L., & Thompson, T. (2020). Primer on Aircraft Induced Clouds and Their Global Warming Mitigation Options. *Transportation Research Record*, 2674(11), 827–841. <https://doi.org/10.1177/0361198120951188>
- Tesche, M., Achtert, P., Glantz, P., & Noone, K. J. (2016). Aviation effects on already-existing cirrus clouds. *Nature Communications*, 7(May), 1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms12016>
- Waitz, I., Townsend, J., Cutcher-Gershenfeld, J., Greitzer, E., & Kerrebrock, J. (2004). Aviation and the Environment: A National Vision Statement, Framework for Goals and Recommended Actions. In *Massachusetts Institute of Technology* (Issue December).