TUGAS AKHIR - RC18-4803

ANALISIS POLA PERGERAKAN PESAWAT TERHADAP BEBAN EMISI KARBON BANDAR UDARA SULTAN HASANUDDIN

YUSTINUS BATISTUTA YUDHIT CHRISTANTYO
NRP. 03111640000160

Dosen Pembimbing :
Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

TUGAS AKHIR - RC18-4803

ANALISIS POLA PERGERAKAN PESAWAT TERHADAP BEBAN EMISI KARBON BANDAR UDARA SULTAN HASANUDDIN

YUSTINUS BATISTUTA YUDHIT CHRISTANTYO
NRP. 03111640000160

Dosen pembimbing:
Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

FINAL PROJECT - RC18-4803

ANALYSIS OF THE MOVEMENT OF AIRCRAFT TO THE CARBON EMISSIONS LOAD OF SULTAN HASANUDDIN AIRPORT

YUSTINUS BATISTUTA YUDHIT CHRISTANTYO
NRP. 03111640000160

Supervisor:
Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D.

DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS POLA PERGERAKAN PESAWAT TERHADAP BEBAN EMISI KARBON BANDAR UDARA SULTAN HASANUDDIN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

YUSTINUS BATISTUTA YUDHIT CHRISTANTYO

NRP. 03111640000160

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D. ……(Pembimbing I)

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

SURABAYA
AGUSTUS, 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS POLA PERGERAKAN PESAWAT TERHADAP BEBAN EMISI KARBON BANDAR UDARA SULTAN HASANUDDIN

Nama Mahasiswa : Yustinus Batistuta Yudhit C.
NRP : 03111640000160
Jurusan : Teknik Sipil – FTSPK - ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D.

ABSTRAK

Salah satu moda transportasi yang sering digunakan pada zaman sekarang ini adalah moda transportasi udara karena mempunyai waktu tempuh yang lebih singkat dan terhindar dari hambatan lalu lintas. Dengan berkembangnya moda transportasi udara ini, maka diperlukan perkembangan pada fasilitas penerbangan, seperti: runway, apron, taxiway, dan gate. Disisi lain, berkembangnya moda transportasi udara dapat membawa dampak negatif yang bersumber dari meningkatnya emisi gas karbon yang dihasilkan oleh aktivitas pembakaran mesin pesawat jet. Gas karbon yang dihasilkan oleh aktivitas pembakaran mesin pesawat jet juga mempunyai dampak buruk bagi kesehatan manusia yang berada disekitar bandara. Gas karbon khususnya CO_2 *yang dalam jumlah banyak bisa menyebabkan manusia terkena penyakit kanker atau gangguan pernapasan. Emisi gas buang yang dihasilkan dari aktivitas pembakaran mesin pesawat terbang juga dapat mempengaruhi rendahnya kualitas kehidupan manusia. Dengan banyaknya dampak negatif dari aktivitas penerbangan, maka pada studi kali ini dilakukan analisis pola pergerakan pesawat terhadap beban dan arah penyebaran emisi karbon di Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Guna meramalkan jumlah penumpang dan pergerakan pesawat, digunakan model ekonometri dengan bantuan software SPSS versi 26 dan metode exponential smoothing serta mengetahui arah penyebaran emisi*

karbon menggunakan metode wind rose guna mendapatkan arah kecepatan angin dominan. Analisis ini diharapkan menjadi acuan bagi semua pihak dari organisasi penerbangan untuk membuat peraturan tentang cara mengurangi jumlah emisi karbon pesawat yang tinggi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin sebesar: 89.480.256 Lbs untuk gas CO_2, 0.38 Lbs untuk gas HC, dan 32.51 Lbs untuk gas CO. Selain itu, juga menjadi acuan bagi pengelola Bandar Udara Sultan Hasanuddin untuk mengembangkan bandar udara yang memperhatikan faktor lingkungan dan membuat batas antara bandar udara dengan pemukiman penduduk, sekolah, dan fasilitas umum lainnya yang terdampak sejauh 3.732 km dari setiap titik referensi dengan persebarannya ke arah selatan dan utara.

Kata Kunci: Pola Pergerakan Pesawat, Beban Emisi Karbon, Bandar Udara Sultan Hasanuddin

ANALYSIS OF THE MOVEMENT OF AIRCRAFT TO THE CARBON EMISSIONS LOAD OF SULTAN HASANUDDIN AIRPORT

Student Name : **Yustinus Batistuta Yudhit C.**
NRP : **03111640000160**
Department : **Civil Engineering – FTSPK - ITS**
Supervisor : **Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D.**

ABSTRACT

The growing mode of air transport can bring negative impacts sourced from the increasing emissions of carbon gases generated by the combustion of jet engine activities. The carbon gas produced by jet engine combustion activities also have a devastating impact on human health around the airport. Carbon gases, especially CO_2 in bulk can cause humans to be affected by cancer or respiratory disorders. Exhaust emissions resulting from the combustion the activity of aircraft engines can also affect the low quality of human life. With the many negative impacts of flight activities, this study was analyzed the movement of the aircraft to the load and the direction of carbon emissions dissemination at Sultan Hasanuddin Airport. In order to predict the number of passengers and aircraft movements, an econometric model is used with the help of SPSS version 26 software and exponential smoothing methods as well as knowing the direction of carbon emissions deployment using the wind Rose method to obtain the direction of the dominant wind velocity. This analysis is expected to be a reference for all parties of the Aviation Organization to make regulations on how to reduce the high number of aircraft carbon emissions at Sultan Hasanuddin Airport for 89.480.256 Lbs for CO2 gas, 0.38 Lbs for HC gas, and 32.51 Lbs for gas CO. In addition, it also served as a reference for Sultan Hasanuddin Airport management to develop airports that pay attention to environmental, schools, and other public facilities that have been

impacted by 3.732 km from each reference point with its southern and northern spread.

Keywords: Aircraft Movement Pattern, Carbon Emissions Load, Sultan Hasanuddin Airport

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur bagi Tuham YME atas anugerah dan rahmat-Nya lah penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "*Analisis Pola Pergerakan Pesawat Terhadap Beban Emisi Karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin*".

Laporan tugas akhir ini tidak akan terselesaikan dengan tepat waktu tanpa bantuan dari beberapa pihak, maka dari itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua Saptandri Widiyanto, SH, DESS, DESM dan Agustina Sulistyorini, S.Pd atas doa dan dukungannya baik secara moril maupun materil.
2. Ibu Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D. Selaku dosen pembimbing tugas akhir.
3. Bapak Ir. Suwarno, MEng. Selaku dosen wali.
4. Bapak dan Ibu dosen serta staf pengajar jurusan Teknik Sipil FTSPK-ITS.
5. Audhi Aprilian dan Mutia Safitri atas bantuannya dalam melakukan pengolahan data.
6. Teman-teman mahasiswa teknik sipil angkatan 2016 (S59) dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis menyadari masih banyak kekurangan, maka dari itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kelengkapan laporan tugas akhir ini. Akhir kata, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan semua pihak yang terkait

Surabaya, Agustus 2020

(Penulis)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....vii
KATA PENGANTAR.....xi
DAFTAR ISI.....xiii
DAFTAR GAMBAR.....xv
DAFTAR TABEL.....xvii
BAB I PENDAHULUAN.....1
1.1 Latar Belakang.....1
1.2 Rumusan Masalah.....5
1.3 Batasan Masalah.....5
1.4 Tujuan.....6
1.5 Manfaat.....6
1.6 Lokasi Studi.....6
BAB II STUDI LITERATUR.....9
2.1 Pola Pergerakan Pesawat Saat LTO.....9
2.2 Karakteristik Pesawat.....12
2.3 Peramalan Jumlah Penumpang.....16
2.4 Analisis Model Ekonometri.....17
2.5 Teori Emisi.....19
2.6 Emisi Karbon Yang Dihasilkan Pesawat.....20
2.7 Lapisan Udara.....21
2.8 Temperatur dan Tekanan Udara.....27
2.9 Kecepatan dan Arah Angin.....28
2.10 *Thrust* atau Daya Dorong.....31

2.11 *Exponential Smoothing* 34
BAB III METODOLOGI 37
3.1 Identifikasi Masalah 37
3.2 Studi Literatur 37
3.3 Pengumpulan Data 37
3.4 Analisis dan Perhitungan 40
3.5 Kesimpulan dan Saran 43
3.6 Bagan Alir Penyusun Tugas Akhir 43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 49
4.1 Analisis Beban Emisi Setiap Jenis Pesawat 49
4.2 Peramalan Penerbangan Metode Ekonometri 75
4.3 Permodelan Emisi Karbon Total Bandara 81
4.4 Perhitungan Jarak Persebaran dan Arah Emisi 85
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 89
5.1 Kesimpulan 89
5.2 Saran 90
DAFTAR PUSTAKA 91
LAMPIRAN 93
BIOGRAFI PENULIS 125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Denah Bandar Udara Sultan Hasanuddin 3
Gambar 1. 2 Lokasi Bandar Udara Sultan Hasanuddin..... 7
Gambar 2. 1 Ilustrasi Siklus *Landing Take Off* 10
Gambar 2. 2 Fase Gerak Pesawat Tipe B738 di Ruang Udara.... 10
Gambar 2. 3 Sudut Serang (*Angle of Attack*) 11
Gambar 2. 4 Penumpang Transportasi Udara Dunia..... 16
Gambar 2. 5 Keberangkatan Pesawat..... 17
Gambar 2. 6 Lapisan Troposfer..... 23
Gambar 2. 7 Lapisan Stratosfer..... 24
Gambar 2. 8 Lapisan Mesosfer..... 25
Gambar 2. 9 Lapisan Termosfer..... 26
Gambar 2. 10 Lapisan Eksosfer 27
Gambar 2. 11 Koreksi Terhadap *Crosswind* 29
Gambar 2. 12 *Wind Rose Plot* 31
Gambar 3. 1 Titik Referensi Analisis Perhitungan Emisi Karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin 39
Gambar 3. 2 Perhitungan Jarak Emisi Karbon 40
Gambar 4. 1 Grafik Kedatangan Pesawat A320, ATR72, B733, B738, B739, CRJX, MD82, dan MD83 Per Tahun..... 51
Gambar 4. 2 Grafik *Payload-Range* Pesawat A-320..... 54
Gambar 4. 3 Grafik *Payload-Range* Pesawat ATR-72..... 55
Gambar 4. 4 Grafik *Payload-Range* Pesawat B-733..... 55
Gambar 4. 5 Grafik *Payload-Range* Pesawat B-738..... 56
Gambar 4. 6 Grafik *Payload-Range* Pesawat B-739..... 56
Gambar 4. 7 Grafik *Payload-Range* Pesawat MD-82 57
Gambar 4. 8 Grafik *Payload-Range* Pesawat MD-83 57
Gambar 4. 9 Grafik *Payload-Range* Pesawat CRJX 58
Gambar 4. 10 Grafik ZFW Pada *Range* 500 (Nm)..... 59
Gambar 4. 11 Grafik Beban Emisi CO_2 Pesawat Per Unit 73
Gambar 4. 12 Grafik Beban Emisi CO Pesawat Per Unit..... 73
Gambar 4. 13 Grafik Beban Emisi HC Pesawat Per Unit..... 74

Gambar 4. 14 Grafik Pertumbuhan Jumlah Penduduk di Kota Makassar pada tahun 2014 – 2019 75
Gambar 4. 15 Grafik Volume Penerbangan Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin 76
Gambar 4. 16 Grafik Beban Emisi CO_2 Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin 84
Gambar 4. 17 Grafik Emisi CO Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin 84
Gambar 4. 18 Grafik Beban Emisi HC Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin 85
Gambar 4. 19 *Wind Rose* Pada Tanggal 2 Juli 2019 86
Gambar 4. 20 Batas Area Yang Terdampak Emisi Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin 87

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi Mesin Pesawat *Turbojet* 13
Tabel 2. 2 Karakteristik Setiap Mesin Pesawat 15
Tabel 2. 3 Konsumsi Rata-Rata Bahan Bakar Setiap Jenis Pesawat 15
Tabel 3. 1 Diagram Alir Penyelesaian Tugas Akhir 44
Tabel 4. 1 Spesifikasi Mesin Pesawat yang Beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin 52
Tabel 4. 2 Jarak Tempuh Pesawat yang Beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin 53
Tabel 4. 3 *Block Fuel Estimate* 59
Tabel 4. 4 *Block Fuel Estimate* Setelah Dilakukan Regresi Linear 60
Tabel 4. 5 Perhitungan ZFW Tipe Pesawat A320 62
Tabel 4. 6 Analisis *Block Fuel Estimate* 62
Tabel 4. 7 Analisis Total *Actual Take Off Weight* 63
Tabel 4. 8 Analisis Total *Thrust* 67
Tabel 4. 9 *Specific Fuel Consumption* 67
Tabel 4. 10 Total Konsumsi Bahan Bakar Riil 68
Tabel 4. 11 Faktor Emisi (Lbs/LTO) 69
Tabel 4. 12 Rasio Bahan Bakar 70
Tabel 4. 13 Faktor Emisi 70
Tabel 4. 14 Beban Polutan 71
Tabel 4. 15 Durasi Penerbangan 72
Tabel 4. 16 Beban Emisi Per Unit 72
Tabel 4. 17 Pengaruh Regresi Ekonometri Setiap Variabel Terhadap Jumlah Penerbangan 77
Tabel 4. 18 Hasil Regresi Ekonometri Pertumbuhan dan Penghasilan Per Kapita Penduduk Terhadap Jumlah Penerbangan 77

Tabel 4. 19 Pengaruh Regresi Ekonometri Pertumbuhan dan Pendapatan Per Kapita Penduduk Di Kota Makassar Terhadap Jumlah Penerbangan.....78
Tabel 4. 20 Peramalan Jumlah Pertumbuhan Penduduk Di Kota Makassar Hingga Tahun 2034.....80
Tabel 4. 21 Peramalan Jumlah Penduduk dan Pergerakan Pesawat 81
Tabel 4. 22 Beban Emisi Rerata Seluruh Pesawat Per Unit.....82
Tabel 4. 23 Beban Emisi Rerata Seluruh Pesawat Per Unit.....83

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan salah satu bidang kegiatan yang memiliki peranan sangat penting dalam kehidupan masyarakat sehari-hari. Keberadaan media transportasi mampu mempermudah seseorang untuk berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya pada jarak yang jauh maupun dekat dalam waktu yang lebih singkat. Media transportasi yang dapat digunakan meliputi kendaraan tidak bermotor maupun kendaraan bermotor, seperti: motor, mobil, kereta api, kapal, dan pesawat. Media transportasi semakin meningkat jumlahnya dari tahun ke tahun disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan manusia terhadap media transportasi yang cepat dan efektif untuk mempermudah berbagai aktivitasnya. Sebagian besar masyarakat lebih memilih menggunakan media transportasi udara dari pada menggunakan media transportasi darat. Hal tersebut dikarenakan pesawat terbang tidak akan mengalami gangguan lalu lintas atau kemacetan sehingga waktu tempuh perjalanan menjadi lebih singkat. Selain itu, tidak adanya gangguan lalu lintas mampu menekan biaya produksi serta mobilitas penyampaian kebutuhan barang maupun jasa. Oleh karena itu, keadaan tersebut harus diimbangi dengan dikembangkannya fasilitas-fasilitas penerbangan yang memadai, seperti: *runway*, *apron*, *taxiway*, dan *gate* pada sebuah bandara.

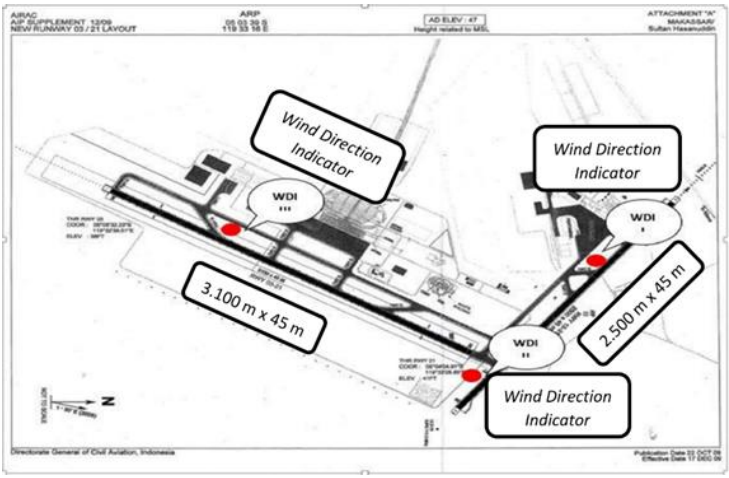
Berdasarkan data yang diperoleh dari PT. Angkasa Pura I dan Direktorat Jendral Perhubungan Udara, jumlah pergerakan pesawat dari tahun 2012 hingga tahun 2016 di Bandar Udara Sultan Hasanuddin mengalami peningkatan dimana jumlah pergerakan pesawat pada tahun 2012 sebesar 41.434 unit, tahun 2013 sebesar 47.379 unit, 2014 sebesar 41.673 unit, tahun 2015 sebesar 44.274 unit, dan pada tahun 2016 sebesar 50.319 unit. Namun, jumlah pergerakan pesawat mengalami penurunan pada tahun 2014 sebesar 5.706 unit. Data jumlah pergerakan penumpang di Bandar Udara Sultan Hasanuddin menunjukkan hal yang serupa dengan

data jumlah pergerakan pesawat, dimana pada tahun 2014 jumlah pergerakan penumpang mengalami penurunan. Data jumlah pergerakan penumpang tersebut pada tahun 2012 sebesar 3.426.763 jiwa, tahun 2013 sebesar 3.892.185 jiwa, tahun 2014 sebesar 3.729.278 jiwa, tahun 2015 sebesar 3.894.860 jiwa, dan tahun 2016 sebesar 4.514.953 jiwa. Tahun 2019 kepala Badan Pusat Statistik (BPS) Suhariyanto mengatakan bahwa tingginya harga tiket pesawat bisa berdampak luas pada berbagai sektor terutama pariwisata. Berdasarkan data BPS tahun 2019 kenaikan harga tiket berdampak pada penurunan penumpang domestik sebesar 21.94% dari 7.73 juta menjadi 6.03 juta penumpang.

Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa pola pergerakan baik pesawat maupun penumpang dari tahun ketahun selalu berfluktuasi atau bisa dikatakan naik dan turun. Salah satu faktor yang menyebabkan permintaan transportasi udara mengalami penurunan yaitu kenaikan harga tiket. Menurut pelaku industri penerbangan yang tergabung dalam *Indonesia National Air Carriers Association* (INACA) kenaikan harga tiket tersebut dipengaruhi oleh meningkatnya harga bahan bakar pesawat (avtur), nilai tukar rupiah terhadap dolar, dan pajak penerbangan domestik yang tinggi sebesar 10%.

Bandar Udara (Bandara) Sultan Hasanuddin dengan kode (IATA: UPG, ICAO: WAAA) merupakan salah satu penyedia fasilitas dan jasa layanan penerbangan yang berlokasi di Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia. Bandara ini bernama Lapangan Terbang Kadieng yang terletak 30 km dari Kota Makassar. Menurut Keputusan Menteri Republik Indonesia No. 49 Tahun 2019, Bandar Udara Sultan Hasanuddin memiliki dua landasan pacu dengan panjang 3.100 m x 45 m dan 2.500 m x 45 m. Bandar Udara Sultan Hasanuddin juga melayani penerbangan Internasional yang dioperasikan oleh PT. Angkasa Pura I. Berdasarkkan data yang diperoleh, Bandar Udara Sultan Hasanuddin menempati peringkat ke-4 dengan penerbangan tersibuk di Indonesia. Dibawah ini merupakan gambar lokasi bandar udara yang menunjukan fasilitas utama bandar udara dan

penunjuk arah angin. Titik berwarna merah yang ada pada gambar dibawah ini menunjukan letak *Wind Direction Indicator* (WDI) atau biasa disebut dengan indikator yang menunjukan arah angin. Terdapat tiga indikator arah angin yang terdapat pada *runway* utama dengan panjang 3.100 m x 45 m, pada *runway* kedua dengan panjang 2.500 m x 45 m, dan pada pertemuan antara *runway* utama dengan *runway* kedua seperti terlihat pada Gambar 1.1 dan ini menjadi salah satu alasan penulis memilih Bandar Udara Sultan Hasanuddin guna dianalisis persebaran dan beban emisinya.



Gambar 1. 1 Denah Bandar Udara Sultan Hasanuddin
(Sumber: PT. Angkasa Pura I)

Namun, disisi lain adanya aktivitas transportasi udara ini juga menghasilkan emisi gas buang yang merupakan salah satu penyebab terjadinya pencemaran udara dan dapat merusak lapisan ozon pada saat pesawat memasuki fase *cruise*. Pada fase LTO pencermaran udara juga bisa berdampak buruk bagi kesehatan masyarakat yang ada disekitar bandar udara karena banyaknya emisi karbon yang terbuang dari hasil pembakaran mesin pesawat terbang. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh *Environmental Monitoring and Evaluation Program* (EMEP) tahun 2009,

pengukuran emisi pesawat udara pada fase LTO yang lebih akurat dapat dibagi dalam beberapa fase-fase kecil diantaranya fase *taxi out*, *take off*, *climb out*, *approach landing*, *landing* dan *taxi in*. Hingga saat ini EMEP hanya mengeluarkan besar konsumsi bahan bakar dan faktor emisi untuk gas CO, NOx, dan HC untuk pengukuran ketujuh fase tersebut, sedangkan untuk beberapa gas pencemar lainnya masih belum tersedia. Gas buang yang dihasilkan dari aktivitas penerbangan menyumbang sekitar 3% dari total gas emisi udara dunia dan akan selalu meningkat seiring meningkatnya jumlah pengoprasian pesawat terbang. Selain aktivitas pembakaran mesin-mesin pesawat terbang, pencemaran udara juga disebabkan oleh jejak asap pesawat terbang (*constrails*) *exhaust* menghasilkan uap air (H_2O dan Hidro karbon) dan karbon dioksida (CO_2) yang bertahan dilingkungan atmosfer sehingga dapat mempengaruhi efek rumah kaca.

Adanya dampak negatif dari aktivitas penerbangan, maka perlu dilakukan kontrol emisi gas pada moda transportasi udara dengan cara melakukan analisis terkait beban emisi gas (karbon) penyebab emisi polutan terbesar, seperti karbon dioksida (CO_2). Hal tersebut sesuai dengan Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 61 Tahun 2011 bahwa pengontrolan emisi gas pada setiap bidang akan menurunkan kadar Gas Rumah Kaca (GRK) salah satunya karbon, sebesar 26% - 41%. Upaya penurunan emisi gas pada bidang transportasi terutama untuk moda transportasi darat sudah banyak dilakukan. Namun, belum ada langkah nyata dari pemerintah ataupun instansi terkait untuk melakukan kontrol emisi gas pada moda transportasi udara. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis terkait beban emisi gas (karbon) yaitu: karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), dan hidrokarbon (HC) dengan cara mengetahui pola pergerakan pesawat serta besaran nilai emisi gas karbon yang dihasilkan pesawat. Analisis terkait emisi pesawat ini penting guna memprakirakan area yang menjadi pengumpulan emisi di sekitar bandara. Area pengumpulan emisi tersebut, nantinya menjadi area yang perlu ada pembatasan terkait area pemukiman maupun sekolah dan fasilitas umum lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas terdapat berbagai rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pola pergerakan pesawat yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin?
2. Bagaimana pola pertumbuhan dan perkembangan penumpang serta maskapai penerbangan di Bandar Udara Sultan Hasanuddin?
3. Bagaimana perkiraan beban emisi gas karbon yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin?
4. Bagaimana arah angin mempengaruhi penyebaran emisi karbon di Bandar Udara Sultan Hasanuddin?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah tentang analisis pola pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin sangat luas cakupannya. Guna mencegah meluasnya pembahasan masalah pada analisis, maka pada studi ini penulis membatasi ruang lingkupnya. Beberapa batasan yang harus diperhatikan, antara lain:

1. Hanya gas yang menandung unsur karbon (C) saja yang dianalisis.
2. Analisis pertumbuhan pengguna dan penyedia jasa penerbangan hanya menggunakan metode regresi linear ekonometrika.
3. Emisi gas karbon yang dianalisis, hanya dari aktivitas pembakaran mesin pesawat terbang.
4. Analisis beban emisi karbon dilakukan dengan metode permodelan emisi karbon akibat pergerakan pesawat saat *take off* di *runway*.
5. Jenis pesawat yang ditinjau hanya pesawat penumpang.
6. Tidak dilakukan pengumpulan data primer dilapangan (survei lapangan).

7. Perkiraan lokasi yang menjadi tempat tertumpuknya emisi adalah hanya berdasarkan arah dan kecepatan angin saja.

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir yang dikerjakan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pola pergerakan pesawat yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin.
2. Mengetahui pola pertumbuhan dan perkembangan penumpang serta maskapai penerbangan di Bandar Udara Sultan Hasanuddin.
3. Mengetahui nilai beban emisi gas karbon yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin.
4. Mengetahui arah penyebaran emisi karbon akibat pola pergerakan angin di Bandar Udara Sultan Hasanuddin.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari Tugas Akhir ini adalah untuk dapat memperkirakan nilai beban emisi karbon dan bisa mejadi acuan ketika mengembangkan suatu bandar udara dengan memperhatikan faktor lingkungan serta memberikan batasan bagi area tertumpuknya beban emisi karbon terhadap pemukiman, sekolah, dan fasilitas umum lainnya.

1.6 Lokasi Studi

Lokasi analisis pola pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon pada studi kali ini adalah Bandar Udara Sultan Hasanuddin yang terletak 30 km dari Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia, seperti terlihat pada Gambar 1.2.

Gambar 1. 2 Lokasi Bandar Udara Sultan Hasanuddin
(Sumber: *Google Earth*, 2019)

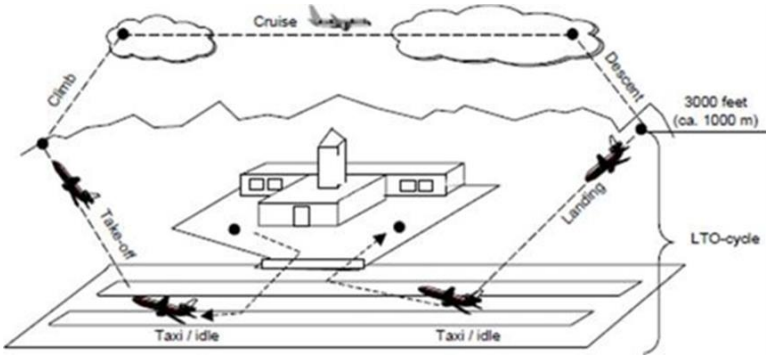
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II
STUDI LITERATUR

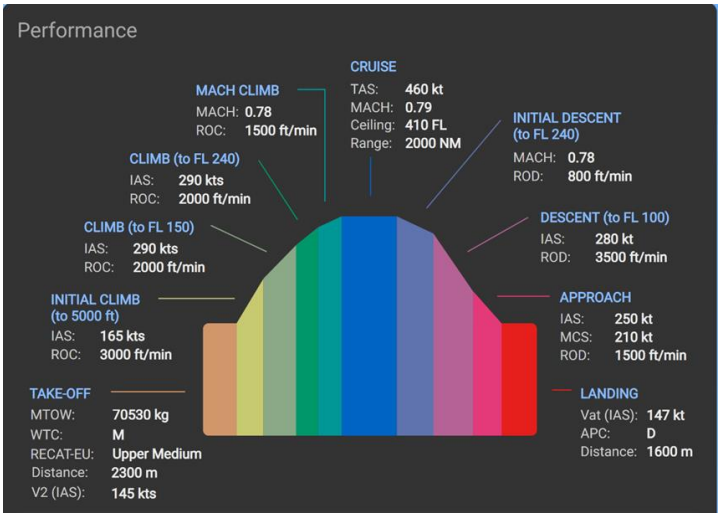
Pada bab ini akan disertakan teori-teori pendukung yang akan digunakan dalam analisa tugas akhir Analisis Pola Pergerakan Pesawat Terhadap Beban Emisi Karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Teori pendukung yang dimaksud anatara lain: pola pergerakan pesawat saat LTO, karakteristik pesawat, peramalan jumlah penumpang, analisis model ekonometri, teori emisi, emisi karbon yang dihaslikan pesawat, lapisan udara, temperatur dan tekanan udara, kecepatan dan arah angin, thrust atau daya dorong pada pesawat, dan metode *exponential smoothing*.

2.1 Pola Pergerakan Pesawat Saat LTO

Menurut Penner (1999), LTO atau yang biasa disebut *Landing Take off* adalah suatu siklus pendaratan dan lepas landas pesawat. Siklus ini meliputi hampir setengah dari kegiatan sebuah pesawat dalam melakukan penerbangan pada ketinggian 3000 kaki (1000 m) dari permukaan laut. Siklus LTO terbagi menjadi beberapa bagian yaitu: *taxi* dan *idle out*, *lift off*, *climb out* (pesawat sedang terbang naik), *cruise* (pesawat sedang terbang datar), *descent* (pesawat sedang terbang turun), dan *approuch*. Pembagian tersebut dilakukan beradasarkan fase-fase yang dialami pesawat guna memperoleh beban emisi karbon yang dipikul oleh masing-masing wilayah akibat pergerakan. Berikut adalah sebuah ilustrasi siklus LTO sebuah pesawat terbang dan fase gerak pesawat tipe Boeing 737-800 di udara yang terlampir pada Gambar 2.1 dan 2.2.



Gambar 2. 1 Ilustrasi Siklus *Landing Take Off*
(Sumber: Rypdal, 2000)

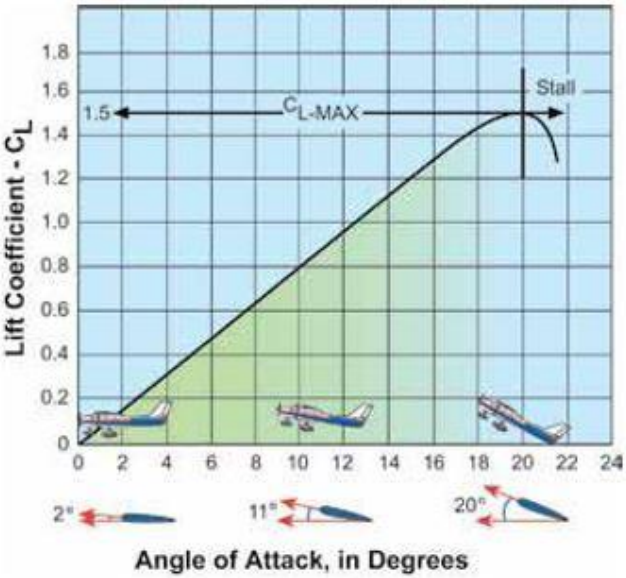


Gambar 2. 2 Fase Gerak Pesawat Tipe B738 di Ruang Udara
(Sumber: *Aircraft Performance Database*, 2019)

Pada fase pertama siklus LTO, pesawat menurun pada ketinggian jelajah, mendekati dan mendarat di landasan pacu atau *runway*. Pada fase kedua saat pendaratan adalah pesawat berjalan pelan (*taxi*) ke *gate*, kemudian masuk kedalam posisi *idle*. Pada

fase ketiga adalah lepas landas, yaitu pesawat berjalan pelan ke landasan pacu (*taxi out*), lepas landas, dan menanjak. Semua fase diatas dapat dapat digunakan untuk memperkirakan emisi suatu pesawat pada sebuah bandara.

Menurut Jimenez (2013), pada saat pesawat melakukan LTO ada sudut yang terjadi antara sayap pesawat dengan aliran udara yang melewati sayap atau biasa disebut dengan sudut serang (*angle of attack*). Jika pada saat *take off* sudut ini terlalu besar, maka pesawat bisa kehilangan daya angkat (*stall*). *Stall* bisa terjadi kapan saja pada saat pesawat mengudara tetapi yang paling berbahaya adalah pada saat pesawat berada dekat permukaan tanah seperti lepas landas dan mendarat serta tidak memiliki cukup ruang untuk mengembalikan gaya angkat. Kehilangan gaya angkat pada saat LTO bisa menyebabkan kecelakaan pada pesawat. Sudut serang (*angle of attack*) pada saat pesawat melakukan LTO dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sudut Serang (*Angle of Attack*)
(Sumber: *Embry-Riddle Aeronautical University*, 2013)

2.2 Karakteristik Pesawat

Karakteristik pesawat yang dimaksud adalah pengklasifikasian pesawat berdasarkan tipe pesawat yang digunakan. Hal ini perlu dipertimbangkan karena jenis mesin yang digunakan oleh masing-masing pesawat berbeda dan berpengaruh pada konsumsi bahan bakar, kecepatan, efisiensi, lama waktu terbang, dan jarak tempuh penerbangan. Secara umum, mesin pesawat terbang dibagi menjadi dua kelompok, yakni *turbojet engine* dan *turbofan engine*. Mesin pesawat *turbojet* terdiri dari: kompresor, ruang pembakaran, dan turbin yang terletak pada bagian belakang mesin. Sementara itu, mesin pesawat *turbofan* juga memiliki bagian-bagian yang sama, namun dilengkapi dengan bilah kipas yang biasanya terletak pada bagian depan kompresor.

Menurut Horonjeff (2010), penambahan kipas pada mesin pesawat *turbofan* bertujuan untuk menambah *bypass ratio* atau perbandingan antara udara yang diteruskan dari pesawat dengan udara yang diserap oleh mesin inti untuk proses pembakaran serta dapat mengurangi konsumsi bahan bakar sekitar 25% - 35%. Nilai *bypass ratio* berkaitan erat dengan konsumsi bahan bakar pesawat, yang berpengaruh terhadap tingkat emisivitas mesin pesawat. Semakin tinggi nilai *bypass ratio* atau semakin banyak udara yang diteruskan dari pada dibakar menggambarkan bahwa semakin rendah bahan bakar yang diperlukan, demikian pula sebaliknya, apabila nilai *bypass ratio* semakin kecil maka pesawat tersebut membutuhkan bahan bakar lebih banyak. Klasifikasi penggolongan pesawat berdasarkan mesin yang dipakai oleh masing-masing tipe pesawat, konsumsi bahan bakar, dan *bypass ratio* pesawat dapat dilihat pada Tabel 2.1 sampai dengan 2.3.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Mesin Pesawat *Turbojet*

Engine Family	***Manufacturer***	***Max. Thrust* (lb)**
Trent 900	Rolls-Royce	76.000 A-380
Trent 800	Rolls-Royce	95.000 B-777-200/300
CR7	General Electric	2.100 Bell-214ST, Saab 340a
CF34	General Electric	20.000 CRJ-100-200/700/900, ARJ21, EMBRAER 170,175,190,195
CF6	General Electric	72.000 A-300, A-310, A-330
Genx	General Electric	75.000 8787, B-747-800
GE90	General Electric	115.000 B-777-200/ER/LR/300ER
CFM56-5B	GE/International Aerospace	33.000 A-318, A-319, A-320, A-321
CFM56-3	GE/International Aerospace	24.000 A-737-300/400/500
CFM56-2	GE/International Aerospace	24.000 B-707, KC-135
CFM56-7B	GE/International Aerospace	27.000 B-737-600/700/800/900, BBJ
CFM56-5A	GE/International Aerospace	27.000 A-319, A-320
CFM56-5C	GE/International Aerospace	34.000 A-340-200/300
V2500	International Aero	33.000 A-319, A-320, A-321, ACJ, MD-90

Tabel 2.1 (Lanjutan)

Engine Family	***Manufacturer***	***Max. Thrust* (lb)**
PW610F	Pratt and Whitney	900 Eclipse 500
PW615F	Pratt and Whitney	1.350 Cessna Mustang
PW617F	Pratt and Whitney	1.700 Embraer Phenom 100
JT8D	Pratt and Whitney	21.000 DC-9, MD-80, SUPER 27
PW6000	Pratt and Whitney	24.000 A318
V2500	Pratt and Whitney	32.000 A-319, A-320, A-321, MD-90
PW2000	Pratt and Whitney	43.000 B-757, C-17, IL-96
JT9D	Pratt and Whitney	56.000 B-747, B-767, A-300, A-310, DC-10
PW4000-94	Pratt and Whitney	62.000 B-747-400, B767-200/300, MD-11, A-300, A-310
PW4000-100	Pratt and Whitney	69.000 A-300-200/300
GP7000	Pratt and Whitney	70.000 A-380
PW4000-112	Pratt and Whitney	98.000 B-777-200/300
RB211-535	Rolls-Royce	43.000 B-757-200/300, Tu-204
Trent 500	Rolls-Royce	56.000 A-340-500/600
RB211-524	Rolls-Royce	61.000 L-1011, B-747-200/400/400/SP/F, B-767-300
Trent 700	Rolls-Royce	71.000 A-330

(Sumber: Horonjeff, 2010)

Tabel 2. 2 Karakteristik Setiap Mesin Pesawat

Aircraft	***Engine***	***Bypass Ratio***	***Specific Fuel Consumption***
A340	CFM56-5C2	6.4	0.32
B-757	PW2037	6	0.33
A-330-300	CF6-80E1A2	5.1	0.33
A320	CFM56-5A1	6	0.33
B737-400/500	CFM56-3Ca	6	0.33
A-310	PW4152	4.9	0.348
B-767-200	CF6-80A2	4.7	0.35
B-747-400	PW4056	4.9	0.359
B-737-600	CFM56-7B20	5.5	0.36
A-321-200	V2533-A5	4.6	0.37
BA-146-300	LF507	5.6	0.406
MD-80	JT8D-219	1.8	0.519

(Sumber: Horonjeff, 2010)

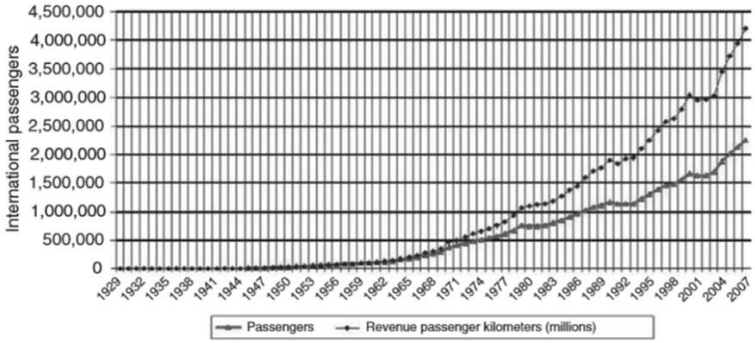
Tabel 2. 3 Konsumsi Rata-Rata Bahan Bakar Setiap Jenis Pesawat

Aircraft	***Engine***	***Fuel Consumption* lb/h**	***Fuel Consumption Per Engine* lb/h**
EMB-145	AE3007A	2.253	1.127
A320-200	CFM56-5A3	4.054	2.027
A-319-100	CFM56-5A4	6.966	3.483
B-737-500	FM56-3B1R	7.879	3.940
B-737-200	JT8B-15A	8.829	4.415
B-757-200	RB211-535E4B	11.109	5.555
B-767-300	CF6-802C2B2F	11.893	5.947
A340-300	CFM-56-5C4	16.093	4.023
B-747-200	RB211-524D4	28.638	7.160

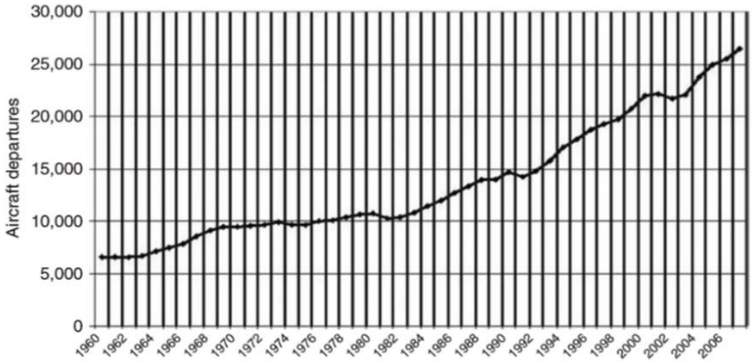
(Sumber: Horonjeff, 2010)

2.3 Peramalan Jumlah Penumpang

Dalam melakukan peramalan jumlah penumpang perlu memproyeksikan kegiatan perjalan udara pada sebuah bandar udara. Peramalan dalam bidang penerbangan merupakan salah satu cara untuk mengetahui kondisi di masa depan sesuai dengan data historis, pola perkembangan, dan permintaan layanan penerbangan di masa yang akan datang. *International Civil Aviation Organization* (ICAO) selaku lembaga Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) yang mengembangkan teknik dan prinsip-prinsip navigasi udara internasional telah mengumpulkan data historis mengenai pertumbuhan penggunaan transportasi udara. Menurut Ashford (2011), peramalan tersebut didasarkan pada tiga variabel berbeda yaitu: penumpang, pergerakan pesawat, dan penumpang-jarak, atau lebih tepatnya "pendapatan" penumpang dalam "pendapatan" penumpang-kilometer. Data statistik menunjukkan bahwa jumlah penumpang pengguna transportasi udara selalu meningkat setiap tahun seperti yang terlihat pada Gambar 2.4 dan 2.5.



Gambar 2. 4 Penumpang Transportasi Udara Dunia
(Sumber: Ashford, 2011)



Gambar 2. 5 Keberangkatan Pesawat
(Sumber: Ashford, 2011)

2.4 Analisis Model Ekonometri

Pendekatan ekonometri digunakan untuk memperlihatkan gambaran laju pertumbuhan aktivitas penerbangan baik dari segi pengguna jasa ataupun penyedia jasa penerbangan. Ekonometrika merupakan pengukuran ekonomi dan juga merupakan suatu alat analisis yang memiliki tipe model aljabar atau secara khusus disebut model *stochastic* yang mengandung satu atau lebih variabel bebas (random). (Gujarati, 2003)

Penggambaran permintaan dengan metode ekonometri melibatkan berbagai variabel bebas seperti ekonomi, sosial, dan operasional. Berdasarkan data historis, secara kuantitatif perlu dihubungkan antara perjalanan udara dengan variabel-variabel yang mempengaruhinya. Model ekonometri telah digunakan selama bertahun-tahun untuk menggambarkan laju pertumbuhan permintaan layanan penerbangan. Selain itu, apabila terjadi perubahan pada variabel dalam peramalan ekonometri selama rentang waktu yang diprediksikan, maka kontrol terhadap perubahan tersebut akan mudah dilakukan dengan mengubah model ekonometri. (Ashford, 2011)

Guna mempermudah proses peramalan menggunakan model ekonometri, maka penulis menggunakan program bantu

Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versi 26. Digunakan model ekonometri karena mengandung berbagai variabel yang membantu proses analisis mencapai hasil yang mendekati kenyataan. Berikut ini merupakan langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan proses peramalan menggunakan metode ekonometri:

1. Memilih serta menentukan variabel-variabel independen atau bebas yang mungkin berpengaruh terhadap proses peramalan yang akan dilakukan.
2. Mengumpulkan data-data terkait mengenai proses peramalan dan memastikan keakuratan dari data yang digunakan tersebut.
3. Memperjelas serta mengkuantitaskan hubungan fungsional yang terdapat diantara variabel-variabel independen dengan permintaan layanan udara.
4. Melakukan analisis data statistik berupa analisis korelasi, analisis faktor, serta analisis regresi linear dan nonlinear.
5. Melakukan pengamatan dan evaluasi terhadap perkembangan kondisi di lokasi yang sebenarnya dengan hasil permodelan peramalan yang diperoleh.

Persamaan yang digunakan dalam model ekonometri ini adalah regresi linear berganda. Dalam regresi linear berganda ada beberapa variabel yang harus diperhatikan, antara lain: jumlah pertumbuhan penduduk di Kota Makassar, pendapatan perkapita penduduk yang berkaitan dengan daya beli masyarakat, jumlah pertumbuhan pada sektor penerbangan yang berkaitan dengan tujuan atau destinasi penerbangan, dan kebijakan pemerintah. Dengan beberapa variabel diatas, maka penulis akan melakukan survei sosioekonomi untuk mendapatkan data terkait dengan pengguna jasa layanan transportasi udara. Berikut adalah persamaan regresi linear berganda:

$$Yest = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \ldots + a_nX_n \tag{2-1}$$

Keterangan:

Y_{est} = Variabel tetap (variabel yang dipengaruhi)

$a_0, a_2, \ldots, a_n$ = Koefisien regresi

$X_1, X_2, \ldots, X_n$ = Variabel bebas (mempengaruhi variabel tetap)

2.5 Teori Emisi

Pencemaran udara adalah suatu kondisi di mana kualitas udara menjadi rusak dan terkontaminasi oleh zat-zat, baik yang tidak berbahaya maupun yang membahayakan kesehatan tubuh manusia. Menurut Peraturan Pemerintah RI No. 41 Tahun 1999 Pasal 1 Ayat 1 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dari komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Menurut Peraturan Pemerintah RI No. 41 tahun 1999 tentang pengendalian pencemaran udara Pasal 1 Ayat 4, udara ambien adalah udara bebas dipermukaan bumi pada lapisan troposfer yang berada di dalam wilayah yuridiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan serta mempengaruhi kesehatan manusia, mahluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya.

Emisi adalah zat, energi dan atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk dan atau dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan atau tidak mempuyai potensi sebagai unsur pencemar. (Peraturan Pemerintah RI No. 41 Tahun 1999)

Pencemaran udara juga dipengaruhi oleh faktor emisi dari suatu aktivitas seperti aktivitas penerbangan maupun aktivitas lainnya. Faktor emisi merupakan emisi yang dihasilkan oleh suatu proses ataupun kegiatan dalam rentan waktu atau jumlah dari bahan bakar yang telah dikonsumsi. *Intergovermental Panel On Climate Change* menyatakan bahwa terdapat berbagai jenis faktor emisi yang dihasilkan dari berbagai sektor seperti faktor emisi dari pesawat terbang tergolong dalam sektor energi kategori transportasi. (IPCC, 2010)

Menurut Indriatmoko dan Purwanta (2017), polutan berupa gas buangan yang dihasilkan oleh industri penerbangan menyumbang sekitar 3% emisi gas rumah kaca dari total gas rumah kaca dunia. Emisi gas rumah kaca tersebut mampu menyebabkan efek pemanasan global dan perubahan iklim yang ekstrim di permukaan bumi sehingga menimbulkan dampak yang besar bagi kehidupan manusia. Emisi gas buangan yang dihasilkan oleh sebuah pesawat udara berasal dari tidak sempurnanya proses pembakaran bahan bakar yang digunakan dimana gas-gas tersebut sangat berbahaya bagi lingkungan maupun kesehatan manusia di sekitarnya bahkan dapat menyebabkan kematian pada konsentrasi yang maksimum. (Jayanti, Hakam, dan Santiasih, 2014)

2.6 Emisi Karbon Yang Dihasilkan Pesawat

Emisi pesawat terbang berasal dari pembakaran mesin jet pesawat. Pesawat terbang mengeluarkan emisi yang terdiri dari 70% CO_2 dan 30% terdiri dari H_2O, NOx, CO, serta SO_2. Emisi dihasilkan dari turbin mesin pesawat pada saat terbang maupun siaga. Emisi pesawat yang ditentukan berdasarkan dari tipe yang digunakan, efisiensi dari mesin pesawat, serta jenis bahan bakar yang digunakan. Emisi yang keluar berbeda pada saat LTO hanya sebesar 10% dari total emisi mesin pesawat terbang dan sisanya terbuang pada saat *cruise*. (IPCC, 2006)

Emisi terpenting yang dikeluarkan oleh pesawat terbang dalam bentuk Gas Rumah Kaca (GRK) dari hasil pembakaran bahan bakar adalah CO_2 dan NOx. serta emisi sampingan seperti metana, N_2O, dan gas lain. Emisi dari bahan bakar dapat dipengaruhi oleh bahan bakar, tipe pesawat, dan mesin pesawat jet yang digunakan. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi emisi dari bahan bakar pesawat yaitu beban pesawat dan ketinggian terbang dari pesawat tersebut. (Rypdal, 2000)

Karbon dioksida (CO_2) merupakan salah satu jenis gas buangan terbesar dari industri penerbangan. Karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan oleh pesawat udara tidak dapat diabsorbsi oleh tumbuhan hijau dan akan langsung terakumulasi di lapisan

atmosfer bumi terkecuali jika tercuci oleh air hujan. Hal tersebut karena pesawat mengudara jauh dari permukaan bumi yaitu sekitar 60-80 km sehingga karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan tidak dapat terjangkau oleh tanaman hijau dan langsung terakumulasi di lapisan atmosfer bumi terutama pada lapisan troposfer dan stratosfer. (Slamet, 2007)

Menurut *Intergovermental Panel On Climate Change* (1999), industri pesawat udara menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) sebanyak 2% per tahun atau sebanyak 13% dari total seluruh emisi karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan oleh kendaraan di permukan bumi. Data tersebut diperkirakan akan terus meningkat sebesar 3% hingga tahun 2050 mendatang. Karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan tersebut akan terakumulasi di lapisan atmosfer selama kurang lebih 100 tahun sehingga akan memberikan dampak yang kumulatif bagi kehidupan di muka bumi.

Berdasarkan data emisi gas buangan tahun 2012, Bandar Udara Sultan Hasanuddin menempati posisi ketiga terbesar dalam menghasilkan emisi gas buangan setelah Bandar Udara Soekarno-Hatta dan Bandar Udara Djuanda Surabaya dengan konsumsi bahan bakar pesawat sebesar 148.292.088 ton. Emisi karbon yang dihasilkan berupa karbon dioksida (CO_2) yaitu sebesar 467.092.547 ton, karbon monoksida (CO) sebesar 497.779 ton, dan hidrokarbon (HC) sebesar 44.988 ton. Selain itu juga, terdapat jenis emisi gas buangan lainnya seperti nitrogen oksida (NOx) sebesar 1.922.258 ton dan sulfur oksida (SOx) sebesar 113.619 ton. Gas-gas yang dihasilkan oleh pesawat tersebut menjadi salah satu sumber terjadinya efek pemanasan baik secara nasional maupun secara global. (Purwanta, 2015)

2.7 Lapisan Udara

Atmosfer merupakan selimut udara yang menyelubungi bumi, sebagian besar tersusun atas: nitrogen, oksigen, uap air, dan partikel-partikel kecil lainnya. Lapisan atmosfer berfungsi mencegah panas berlebih, menahan asteroid, menyerap sinar UV

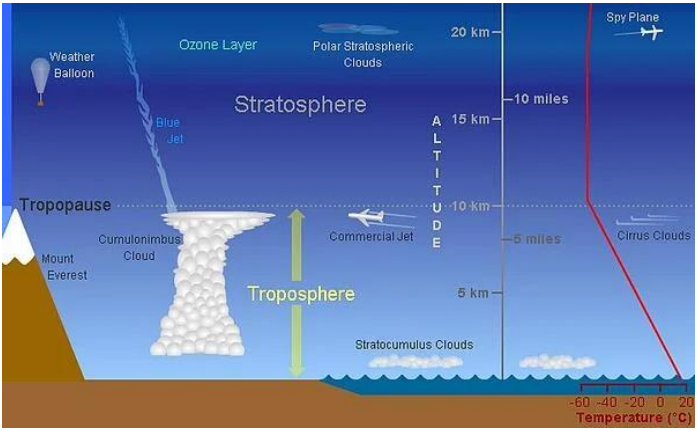
dan menampung zat-zat yang dibutuhkan makhluk hidup. (Assomadi, 2010)

Atmosfer bumi terbagi menjadi 5 lapisan, yaitu: troposfer, stratosfer, mesosfer, termosfer dan eksosfer. Terdapat berbagai fenomena alam yang terjadi pada masing-masing lapisan atmosfer. Masing-masing lapisan atmosfer memiliki karakteristik dan ketinggian masing-masing seperti yang dijelaskan berikut ini:

1. Troposfer

   Troposfer merupakan lapisan terbawah dari atmosfer, yaitu pada ketinggian 0-18 km di atas permukaan laut. Tebal lapisan troposfer rata-rata ± 10 km. Ketinggian lapisan troposfer kurang lebih 16 km dengan temperatur berkisar 80°C pada daerah katulistiwa. Ketinggian lapisan troposfer berkisar 11 km dengan temperatur rata-rata 54°C di daerah sedang, dan pada daerah kutub ketinggiannya berkisar 8 km dengan temperatur rata-rata 46°C. Lapisan troposfer berpengaruh sangat besar terhadap kehidupan makhluk hidup di muka bumi. Lapisan ini menentukan peristiwa-peristiwa seperti cuaca dan iklim serta mengandung berkisar 80% gas-gas dari seluruh gas. Ciri khas yang terjadi pada lapisan ini adalah temperatur udara menurun sesuai dengan perubahan ketinggian, yakni setiap naik 100 meter dari permukaan bumi temperatur udara mengalami penurunan sebesar ± 0.5°C. Lapisan troposfer yang paling atas, yaitu tropopause yang menjadi batas antara troposfer dan statosfer. Temperatur udara di lapisan tersebut relatif lebih konstan berkisar -55°C sampai -60°C walaupun terdapat penambahan ketinggian serta memiliki ketebalan ± 2 km. Semua jenis cuaca, perubahan suhu yang mendadak, angin, tekanan, dan kelembaban udara yang kita rasakan sehari-hari terjadi bergantung pada lapisan troposfer. Ketinggian terendah adalah bagian yang paling hangat dari troposfer. Hal ini dikarenakan permukaan bumi menyerap radiasi panas dari matahari dan menyalurkan panasnya ke udara. Terdapat gas-gas rumah kaca yang menyebabkan efek rumah kaca dan

pemanasan global (*global warming*) pada lapisan troposfer. Lapisan troposfer dapat dilihat pada Gambar 2.6.

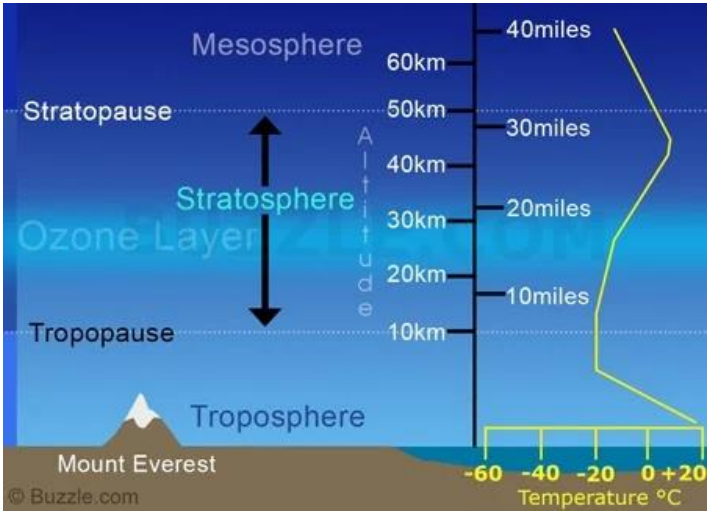


Gambar 2. 6 Lapisan Troposfer
(Sumber: www.google.com)

2. Stratosfer

Lapisan kedua dari atmosfer adalah stratosfer. Stratosfer terletak pada ketinggian 18-49 km dari permukaan laut. Lapisan stratosfer ditandai dengan adanya proses inversi suhu, artinya suhu udara akan meningkat seiring dengan meningkatnya ketinggian dari permukaan bumi. Kenaikan suhu udara berdasarkan ketinggian mulai terhenti, yaitu pada puncak lapisan stratosfer yang disebut stratopause dengan temperatur udara sekitar 0°C. Umumnya temperatur udara pada lapisan stratosfer hingga ketinggian 20 km relatif tetap sehingga disebut sebagai lapisan isometris. Lapisan isometris merupakan lapisan yang paling bawah dari stratosfer. Setelah lapisan isometris, berikutnya terjadi peningkatan temperatur hingga ketinggian ±45 km. Kenaikan temperatur pada lapisan ini disebabkan oleh adanya lapisan ozon yang menyerap sinar ultra violet yang dipancarkan oleh sinar matahari sehingga pada lapisan stratosfer tidak mengandung uap air, awan

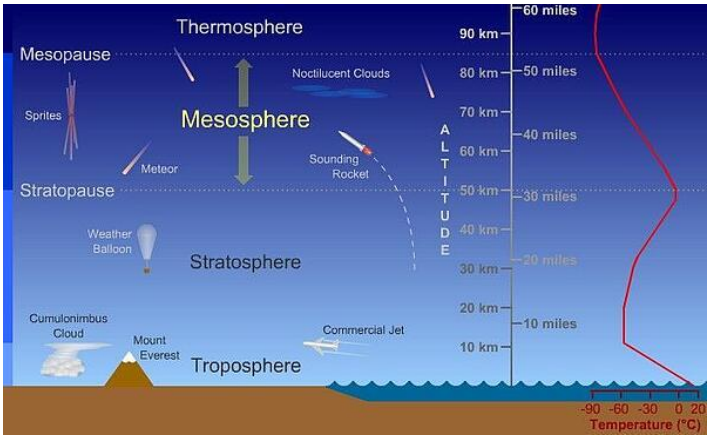
maupun debu atmosfer. Lapisan stratosfer dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Lapisan Stratosfer
(Sumber: www.google.com)

3. Mesosfer

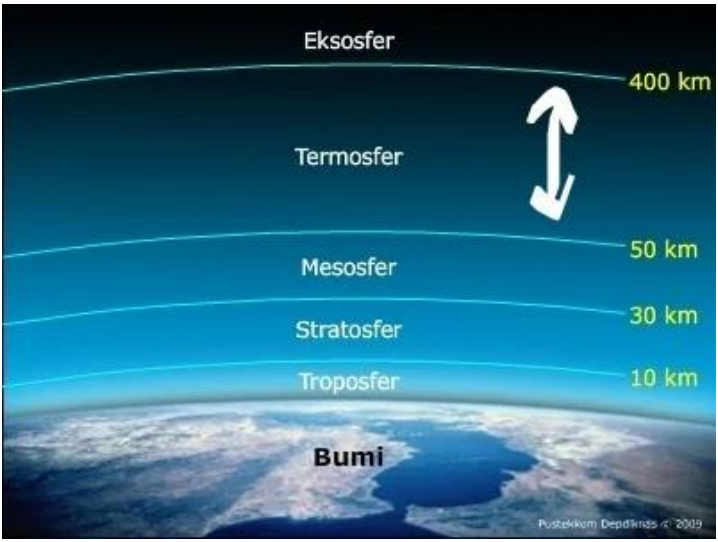
Mesosfer merupakan lapisan udara ketiga, dimana temperatur atmosfer akan berkurang seiring meningkatnya ketinggian hingga ke lapisan keempat. Mesosfer terletak pada ketinggian antara 49-82 km dari permukaan bumi. Lapisan ini merupakan lapisan pelindung bumi dari jatuhnya meteor dan benda luar angkasa lainnya. Udara yang terdapat pada lapisan mesosfer akan mengakibatkan pergesaran dan menghasilkan temperatur yang tinggi. Kebanyakan meteor luar angkasa yang menuju ke bumi akan terbakar pada lapisan ini. Lapisan mesosfer ditandai dengan menurunnya suhu rata-rata sebesar 0.4°C per seratus meter. Temperatur terendah di mesosfer sebesar kurang dari -81°C. Lapisan mesosfer dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Lapisan Mesosfer
(Sumber: www.google.com)

4. Termosfer

Termosfer merupakan lapisan udara peralihan antara mesosfer dengan termosfer yang dimulai dari ketinggian sekitar 82 km. Termosfer terletak pada ketinggian antara 82-800 km dari permukaan bumi. Lapisan termosfer disebut juga sebagai lapisan ionosfer karena menjadi tempat terjadinya ionisasi partikel-partikel yang dapat memberikan efek pada perambatan atau refleksi gelombang radio, baik gelombang panjang maupun pendek. Selain itu juga, pada lapisan termosfer terjadi kenaikan temperatur yang cukup tinggi yaitu berkisar 19.820°C. Kenaikan temperatur tersebut akibat adanya penyerapan radiasi sinar ultraviolet. Lapisan termosfer dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Lapisan Termosfer
(Sumber: www.google.com)

5. Eksosfer

Eksosfer terletak pada ketinggian 800-1000 km dari permukaan bumi. Lapisan eksosfer merupakan tempat terjadinya pergerakan atom-atom secara tidak beraturan. Lapisan ini merupakan lapisan paling panas dan molekul udara dapat meningalkan atmosfer sampai ketinggian 3150 km dari permukaan bumi. Lapisan eksosfer juga sering disebut sebagai ruang antar planet dan geostasioner. Lapisan eksosfer sangat berbahaya karena merupakan tempat terjadinya penghancuran meteor dari luar angkasa. Lapisan Eksosfer dapat dilihat pada Gambar 2.10.

Gambar 2. 10 Lapisan Eksosfer
(Sumber: www.google.com)

Lapisan udara (atmosfer) diatas dapat mempengaruhi perilaku gas buang dari pesawat saat berada pada ketinggian yang telah ditentukan.

2.8 Temperatur dan Tekanan Udara

Saat ini, telah berkembang jenis-jenis pesawat terbang dengan berbagai kemampuan untuk menempuh berbagai jarak, ketinggian, dan kecepatan tertentu. Faktor penting dalam transformasi industri penerbangan yaitu kebutuhan *runway* yang berkaitan dengan keselamatan dan kemampuan operasional pesawat, gangguan suara serta konsumsi energi. Beragam variasi tersebut tidak hanya karena pesawat itu sendiri, melainkan dipengaruhi juga oleh faktor lingkungan tempat operasional.

Pesawat umumnya didesain untuk mampu beroperasi pada ketinggian 15.240 meter dari permukaan laut sehingga sangat penting untuk memahami kondisi lingkungan dan keadaan

atmosfer pada rentang ketinggian tersebut. Operasional pesawat dipengaruhi oleh kelembaban udara, semakin rapat kandungan air dalam udara membuat pesawat makin sulit beroperasi, karena udara yang dibutuhkan untuk mengangkat pesawat semakin tipis. Kerapatan atau kelembaban udara merupakan fungsi dari tekanan udara. Apabila tekanan udara berkurang, maka molekul udara di atmosfer berkurang dan menyebabkan kerapatan udara menjadi kecil. Sebaliknya, apabila temperatur meningkat maka kecepatan gerak antar partikel udara meningkat, sehingga menyebabkan merenggangnya ikatan antar molekul udara dan berkurangnya kerapatan udara. (Horonjeff, 2010)

Selain itu juga, dampak yang dapat ditimbulkan dari meningkatnya temperatur bumi yaitu penurunan daya tahan konstruksi *apron*, *taxiway*, dan *runway* seperti terjadinya *runway buckling*, peningkatan suhu pada kabin pesawat, penurunan kinerja pada mesin pesawat (*lift off load limit*), serta fase *take off* yang membutuhkan waktu lebih lama. Oleh karena itu, peningkatan temperatur dan kelembaban udara di permukan bumi sangat berbahaya bagi industri penerbangan karena mampu menyebabkan tingkat kecelakaan pesawat udara yang semakin meningkat. (Indriatmoko dan Purwanta, 2017)

2.9 Kecepatan dan Arah Angin

Angin merupakan salah satu faktor yang sangat berpengaruh di dalam dunia penerbangan baik itu arah angin ataupun kecepatan angin. Dengan adanya angin, maka dapat mempengaruhi pergerakan pesawat saat sedang mengudara. Selain dapat mempengaruhi pergerakan pesawat, angin juga berperan dalam proses persebaran gas buang pada pesawat. Menurut Horonjeff (2010), didalam dunia penerbangan ada tiga istilah angin, antara lain: *headwind* (arah angin yang berlawanan dengan kepala pesawat), *tailwind* (arah angin yang sejajar dengan ekor pesawat), dan *crosswind* (angin yang tidak sejajar dengan kepala ataupun ekor pesawat). *Headwind* atau arah angin yang berlawanan dengan kepala pesawat ini sangat berpengaruh bagi kinerja

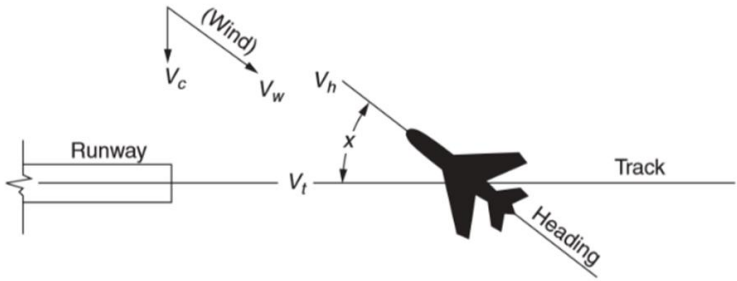
pesawat baik saat *take off* ataupun *landing*. Dengan adanya *headwind*, bisa membuat pesawat *take off* dengan kecepatan yang lebih rendah dan jarak landasan pacu yang lebih pendek serta saat *landing* juga membuat kecepatan pesawat yang lebih rendah. Selain *headwind*, *tailwind* juga sangat berpengaruh pada saat pesawat sedang mengudara karena bisa membantu pesawat mencapai kecepatan yang lebih tinggi.

Menurut Horonjeff (2010), jika pergerakan pesawat selama beroperasi membentuk sudut tertentu (*crab angle*) seperti terlihat pada Gambar 2.5, maka harus dilakukan koreksi perhitungan kecepatan pesawat dan angin seperti perumusan dibawah ini:

$$\text{Sinx} = \frac{Vc}{Vh} \tag{2-2}$$

Dimana:

V_c = *Crosswind* (Mil/Jam) / (Knot)
V_h = *Airspeed* (Mil/Jam) / (Knot)
x = *Crab Angle* (˚)



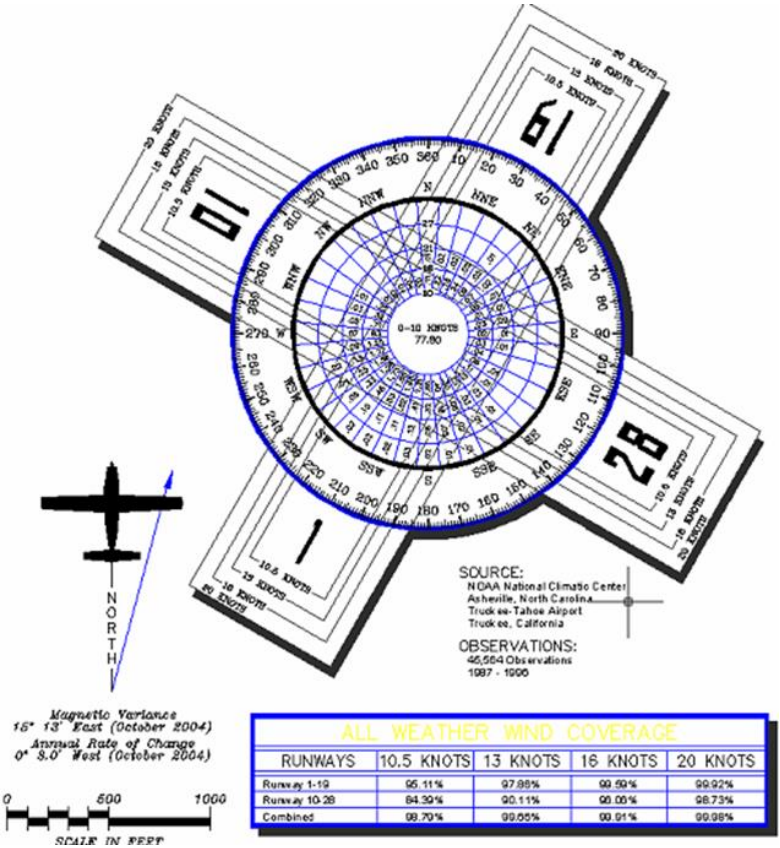
Gambar 2. 11 Koreksi Terhadap *Crosswind*
(Sumber: Horonjeff, 2010)

Selain melakukan perhitungan terhadap kecepatan angin, perlu juga menghitung arah angin. Metode yang digunakan dalam perhitungan arah angin ini adalah dengan cara *wind rose*. Dengan metode *wind rose* bisa mendapatkan arah angin untuk perencanaan

runway dan bisa untuk menentukan dimana lokasi arah dan kecepatan angin dominan guna mengetahui lokasi tertumpuknya beban emisi karbon yang berada di Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Berikut adalah prosedur dalam pengolahan data untuk menganalisis *wind rose*:

1. Melakukan survei data kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) tentang arah dan kecepatan angin di Bandar Udara Sultan Hasanuddin.
2. Melakukan pemilihan data yang akan dipakai untuk data terpakai
3. Membagi masing-masing data ke dalam beberapa kecepatan seperti terlihat pada Gambar 2.11 sesuai ketentuan ICAO, yaitu:

    - Kecepatan kurang dari 4 knot.
    - Kecepatan antara empat hingga 10 knot.
    - Kecepatan antara 10 hingga 13 knot.
    - Kecepatan antara 13 hingga 20 knot.
    - Kecepatan antara 20 hingga 40 knot.
    - Kecepatan lebih dari 40 knot.



RUNWAYS	10.5 KNOTS	13 KNOTS	16 KNOTS	20 KNOTS
Runway 1-19	95.11%	97.86%	99.59%	99.92%
Runway 10-28	84.39%	90.11%	96.06%	98.73%
Combined	98.70%	99.65%	99.91%	99.98%

Gambar 2. 12 *Wind Rose Plot*
(Sumber: www.google.com)

2.10 *Thrust* atau Daya Dorong

Thrust merupakan daya dorong yang dihasilkan dari mesin pesawat terbang untuk memberikan tenaga dorongan bagi pesawat. Pesawat yang menggunakan mesin jet mendapatkan daya dorong dari beban gas akibat perubahan tekanan dan momentum dari arus gas yang bereaksi pada struktur mesin dan bagian perputarannya. Beberapa jenis *thrust* antara lain:

1. *Gross/static trust*: gaya dorong total yang dihasilkan ketika mesin dalam kondisi statis (tidak bergerak) dan sebagai hasil pergerakan massa udara melewati mesin, serta kecepatan jet pada bilah putar.
2. Momentum *drag*: tarikan yang dihasilkan akibat momentum udara yang melewati mesin bersifat relatif.
3. *Net thrust*: Hasil dari massa udara yang melewati sebuah mesin pada saat mengudara dan perubahan kecepatan yang terjadi.

Menurut ICAO (2010) *thrust* digunakan untuk menghasilkan suatu energi yang akan digunakan untuk pergerakan pesawat udara dimana besarnya *thrust* sebanding dengan banyaknya bahan bakar pesawat yang digunakan. Nilai *thrust* yang tedapat pada setiap fase pergerakan pesawat berbeda-beda bergantung pada lama tidaknya proses pergerakan pesawat tersebut. Nilai *thrust* terbesar terdapat pada saat fase *take off* dimana energi yang dihasilkan sebesar 100% yang digunakan oleh pesawat untuk bergerak menanjak ke atas. Nilai *thrust* pada fase *landing* sebesar 30% dan nilai *thrust* terkecil terdapat pada fase *taxi in* yaitu sebesar 7%. Namun, pada fase ini menghasilkan emisi gas NO_x yang jauh lebih besar daripada fase *landing*. Hal tersebut terjadi karena pada fase *taxi in* pesawat membutuhkan waktu yang lebih lama, yaitu berkisar 13 menit sedangkan pada saat fase *landing* pesawat hanya membutuhkan waktu berkisar 4 menit sehingga proses pembakaran membutuhkan energi lebih banyak dan emisi gas NO_x yang dihasilkanpun lebih banyak. (Kaleka, Suyasa, dan Mahendra, 2015)

Cara yang dilakukan untuk menganalisis *thrust* atau daya dorong pada pesawat di Bandar Udara Sultan Hasanuddin dibutuhkan data mengenai pesawat yang beroperasi dan spesifikasinya. Setelah mengetahui pesawat yang beroperasi dan spesifikasi setiap jenis pesawat, maka dibutuhkan data pendukung lainnya berupa jarak penerbangan maksimum, minimum, dan rata-rata yang ditempuh oleh setiap jenis pesawat karena untuk menentukan kinerja pembakaran bahan bakar pesawat yang

menghasilkan emisi karbon. Analisis *thrust* diperlukan untuk menentukan jumlah bahan bakar yang digunakan ketika pesawat mengudara. Berdasarkan hasil analisis *thrust* yang menghasilkan konsumsi bahan bakar nyata dan faktor emisi dari setiap pesawat, dapat dihitung beban emisi oleh masing-masing jenis pesawat dengan mengalikan total konsumsi bahan bakar dengan faktor emisi dan beban polutan. Beban polutan dalam pembakaran bahan bakar pada pesawat yang menggunakan mesin jet menggunakan satuan $kg \cdot h^{-1}$.Guna memperoleh nilai emisi pada pesawat, maka dilakukan penggabungan data dari setiap jenis pesawat, mesin yang digunakan, dan data emisi pada setiap jenis mesin. Beban emisi yang telah didapatkan, kemudian didistribusikan mengikuti fase gerak pesawat, antara lain: *lift off*, *climb out*, *cruise*, *descent*, dan *approach.* Setiap fase pergerakan pesawat memiliki tingkat ketinggian terbang masing-masing yang menghasilkan konsentrasi emisi yang berbeda. Konsentrasi ini tergantung pada *thrust* atau gaya dorong pesawat. (Ahyudanari, 2019)

Selain itu, guna menghitung *thrust* atau gaya dorong pada setiap tipe pesawat dengan jenis *turbofan* dan *turboprop* juga dapat digunakan metode perhitungan lain. Ada beberapa parameter yang dibutuhkan guna melakukan perhitungan, antara lain: berat pesawat (W), kecepatan pada saat pesawat berada di darat (Vstal), kecepatan pada pesawat saat lepas landas (Vto), luas daerah (S), efektifitas mesin pesawat (ηp), koofisien lift minimum (Clmax), dan nilai *thrust* statis (To). Berikut merupakan beberapa tahapan dalam menghitung gaya dortong atau *thrust.*

1. Menghitung berat pesawat (W) dengan cara mengetahui spesifikasi setiap tipe pesawat, lalu mengkaitkannya dengan jarak penerbangan (minimum, maksimum, dan rerata), durasi terbang, dan konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan oleh pesawat. Selain itu untuk mengetahui berat pesawat juga digunakan grafik *payload* sebagai acuan dalam menentukan berat pesawat karena setiap pesawat tidak semua terbang dalam kondisi bermuatan penuh.

2. Menghitung kecepatan pesawat pada saat di darat (Vstall) dan kecepatan pesawat pada saat lepas landas (Vto) dengan menggunakan rumus dibawah ini.

$$\text{Vstall} = \sqrt{\frac{\text{W}}{\frac{1}{2} \text{ x } \rho \text{ x S x Clmax}}} \tag{2-3}$$

$$\text{Vto} = 1.2 \text{ x Vstall} \tag{2-4}$$

3. Menghitung daya dorong (*thrust*) dan total *thrust*

$$\textit{Thrust} = \frac{\text{T x } \eta\text{p}}{\text{Vto}} \tag{2-5}$$

$$\text{Total } \textit{Thrust} = \textit{Thrust} \text{ x n (mesin yang dipakai)} \tag{2-6}$$

2.11 *Exponential Smoothing*

Exponential smoothing atau dalam bahasa Indonesia disebut dengan Penghalusan Eksponensial adalah suatu metode peramalan rata-rata bergerak yang memberikan bobot secara eksponensial atau bertingkat pada data-data terbarunya sehingga data-data terbaru tersebut akan mendapatkan bobot yang lebih besar. Dengan kata lain, semakin baru datanya, maka semakin besar juga bobotnya. Hal ini dikarenakan data yang terbaru lebih relevan sehingga diberikan bobot yang lebih besar. Parameter penghalusan (*smoothing*) biasanya dilambangkan dengan α (*alpha*) untuk kejadian yang baru terjadi, α (1-α) untuk kejadian selanjutnya, dan α $(1-\alpha)^2$ untuk kejadian berikutnya.

Dalam bentuk yang sederhana, maka hasil peramalan yang baru (untuk waktu t+1) dianggap sebagai rerata berfaktor (α) untuk kejadian yang baru terjadi (pada waktu t) dan pada kejadian yang sudah berlalu diberikan factor (1-α) dengan nilai α dapat

diasumsikan $0<\alpha<1$. Dibawah ini merupakan persamaan yang digunakan.

$$Y = [\alpha \times Y_t] + [(1- \alpha) \times Y_{t-1}] \tag{2-7}$$

Selain metode *exponential smooting*, ada metode lain dalam tingkatan yang lebih lanjut biasa dikenal dengan metode Holt's. Selain melibatkan hasil peramalan akibat data, metode ini juga melibatkan pengaruh pola pertumbuhan data tersebut. Dibawah ini merupakan rumus dari metode Holt's.

1. Prakiraan nilai sekarang (*current level estimate*)

$$Lt = [\alpha \times Y_t] + [(1 - \alpha) \times Yt\text{-}1] \tag{2-8}$$

2. Prakiraan Pola (*trend estimate*)

$$Tt = \beta \times (Lt - Lt\text{-}1) + (1 - \beta) \times Tt\text{-}1 \tag{2-9}$$

3. Prakiraan pada periode p

$$Y = Lt + Tt \times p \tag{2-10}$$

Dimana:

Y = Hasil peramalan / *forecasting*
α = Konstanta *smoothing* untuk data ($0<\alpha<1$)
β = Konstanta *smoothing* untuk tren / pola ($0<\beta<1$)
Yt = Hasil prakiraan atau data eksisting waktu t
Lt = Nilai baru yang disederhanakan
Tt = Prakiraan pola
P = Periode prakiraan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III
METODOLOGI

Dalam proses pengerjaan tugas akhir ini, dibutuhkan metodologi untuk menyususn kerangka pengerjaan guna mempermudah pelaksanaan studi. Metode yang digunakan dalam analisis pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin ini merujuk pada beberapa literatur dan merupakan metode yang paling mendekati kondisi sebenarnya sehingga dapat diperoleh hasil yang akurat. Metode analisis yang digunakan terdiri dari beberapa tahap, meliputi: Identifikasi masalah, studi literatur, pengumpulan data, analisis data dan perhitungan, hingga didapatkan hasil dari analisis tersebut, berupa kesimpulan dan saran tentang beban emisi dan pergerakan pesawat.

3.1 Identifikasi Masalah

Pada tahap ini penulis mengidentifikasi permasalahan yang terjadi saat ini dengan mempelajari isu-isu terkait pergerakan pesawat serta lingkungan dan pencemaran udara. Oleh karena itu penulis mengangkat topik analisis pola pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin.

3.2 Studi Literatur

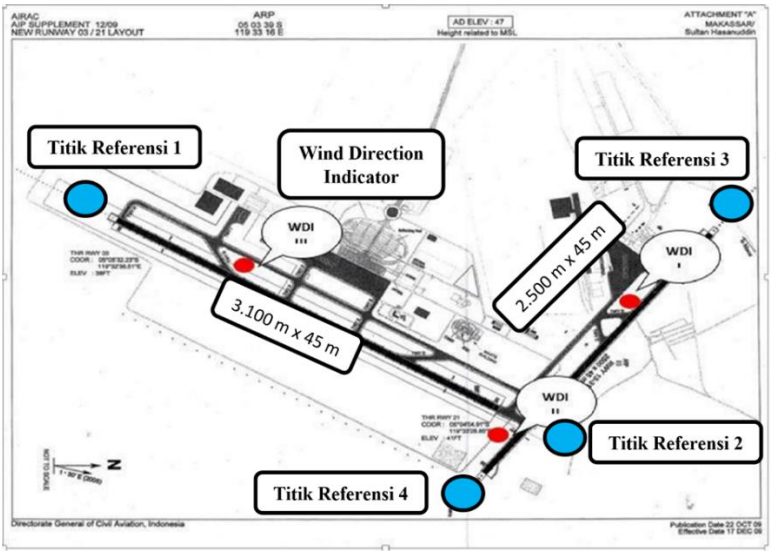
Pada tahap ini penulis mencari referensi guna menunjang pengerjaan tugas akhir tentang analisis pola pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Referensi tersebut berupa jurnal ilmiah, buku, informasi dari internet, dan sebagainya yang berkaitan dengan topik tugas akhir.

3.3 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data pendukung terkait tugas akhir analisis pola pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Data-data pendukung tersebut merupakan data sekunder yang

bukan merupakan pengukuran langsung dilapangan. Berikut adalah data-data pendukung yang dibutuhkan:

- Pola Pergerakan Pesawat
  Data ini merupakan data pergerakan pesawat penumpang berupa volume penerbangan yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin baik domestik ataupun internasional pada tahun 2014 sampai dengan 2019. Data ini digunakan untuk mengetahui tipe dan jarak terbang pesawat dalam periode waktu rencana.
- Spesifikasi Pesawat
  Data ini merupakan data tipe pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin, tipe mesin yang digunakan, konsumsi bahan bakar yang diperlukan, dan berat setiap pesawat. Data ini digunakan agar dapat mengetahui setiap tipe mesin pesawat dan konsumsi bahan bakar dari setiap tipe pesawat tersebut serta kapasitas bahan bakar maksimal.
- Data Emisi
  Data ini merupakan data emisi gas yang diperoleh dari hasil penelitian dan uji sampel emisi pada pesawat yang bersesuaian serta faktor emisi dari masing-masing zat uji. Data ini digunakan untuk menghitung beban emisi karbon di sekitar Bandar Udara Sultan Hasanuddin dalam periode rencana. Titik referensi yang akan ditinjau dari perhitungan beban emisi karbon ini terdiri dari beberapa bagian, seperti ditunjukan pada lingkaran biru 1 dan 2 untuk *runway* utama serta gambar lingkaran biru 3 dan 4 untuk *runway* kedua serta lingkaran yang berwarna merah adalah *Wind Direction Indicator* atau indikator penunjuk arah angin dapat dilihat pada Gambar 3.1.

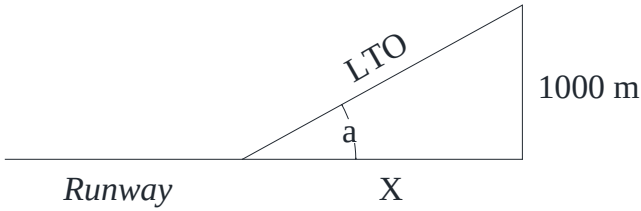


Gambar 3. 1 Titik Referensi Analisis Perhitungan Emisi Karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin
(Sumber: PT. Angkasa Pura I)

Berikut ini adalah rumus yang dipakai guna menghitung jarak penyebaran emisi karbon dari ujung *runway* terhadap titik referensi yang ditinjau, seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. Jarak X yang dihitung dipengaruhi oleh jumlah volume pesawat yang melakukan LTO di Bandar Udara Sultan Hasanuddin.

$$\text{Tan } \alpha = \frac{1000 \text{ meter}}{X} \tag{3-1}$$

Keterangan:
X = Jarak penyebaran emisi karbon pesawat terbang
α = Sudut serang (*angle of attack*) saat LTO
1000 = Ketinggian pesawat dari fase *climb* menuju *cruise* (m)
LTO = Fase *take off* menuju *climb*



Gambar 3. 2 Perhitungan Jarak Emisi Karbon

- Data Meteorologis
  Data meteorologis ini merupakan data kelembaban udara, suhu, arah, dan tekanan angin yang didapatkan langsung dari BMKG di Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Data tersebut digunakan untuk menentukan variabel yang dapat mempengaruhi perilaku gas emisi dalam proses pembakaran mesin pesawat serta arah persebarannya.
- Data Sosioekonomi
  Data sosioekonomi merupakan data yang digunakan dalam peramalan model ekonometri. Data tersebut berupa pendapatan domestik regional bruto dan jumlah penduduk kota Makassar dalam periode rencana. Data ini juga digunakan untuk mengetahui jumlah peminat pengguna layanan udara dimasa yang akan datang.

3.4 Analisis dan Perhitungan

Pada tahap ini penulis mengolah data yang telah diperoleh dari beberapa sumber guna menganalisis pola pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Berikut adalah beberapa tahap dalam menganalisis data yang diperoleh:

- Menganalisis data pola pergerakan pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin terkait dengan intensitas dan jarak penerbangan. Menganalisis data tersebut dengan cara melakukan pengelompokkan setiap jenis pesawat yang berada di Bandar Udara Sultan Hasanuddin, kemudian dilihat

jenis pesawat apa yang paling dominan pada bandar udara tersebut. Selain mendapatkan data tentang pesawat yang paling dominan, disini juga dapat mengetahui jarak penerbangan yang dilakukan oleh masing-masing pesawat dan kemudian bisa dihitung konsumsi bahan bakar yang diperlukan untuk mencapai jarak tersebut.

- Menganalisis kontribusi setiap jenis pesawat terhadap emisi karbon dengan memperhatikan beban emisi, spesifikasi pesawat, dan konsumsi bahan bakar serta *thrust*. Pada analisis ini kita mengetahui setiap jenis mesin pesawat dan dapat menghitung jumlah emisinya sesuai dengan konsumsi bahan bakar yang diperlukan oleh setiap mesin pesawat.
- Menganalisis data arah angin di Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Pada analisis ini kita bisa menggunakan metode *wind rose* dengan langkah-langkah sebagai berikut:

  a. Melakukan survei data kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) tentang arah dan kecepatan angin di Bandar Udara Sultan Hasanuddin.
  b. Melakukan pemilihan data yang akan dipakai untuk data terpakai.
  c. Membagi masing-masing data ke dalam beberapa kecepatan sesuai ketentuan ICAO dengan cara membagi beberapa kecepatan angin, yaitu: kecepatan kurang dari 4 knot, kecepatan antara empat hingga 10 knot, kecepatan antara 10 hingga 13 knot, kecepatan antara 13 hingga 20 knot, kecepatan antara 20 hingga 40 knot, dan kecepatan lebih dari 40 knot.
  d. Membuat matrik arah angin terhadap kecepatan angin, sehingga didapatkan sejumlah data untuk masing-masing arah dan kelompok kecepatan tertentu.
  e. Membuat *wind rose type-1*, terkait dengan presentase jumlah data terhadap arah angin yang dominan
  f. Membuat *wind rose type-2*, terkait dengan presentase jumlah data terhadap arah dan kecepatan angin sesuai matrik.

- Menghitung laju pertumbuhan aktivitas penerbangan guna meramalkan perkembangan aktivitas penerbangan dengan menggunakan model ekonometrika. Dalam perhitungan ini penulis menggunakan program bantu SPSS versi 26 dengan regresi linear berganda. Berikut adalah langkah-langkah untuk menggunakan SPSS:

  a. Memilih serta menentukan variabel-variabel independen atau bebas yang mungkin berpengaruh terhadap proses peramalan yang akan dilakukan.
  b. Mengumpulkan data-data terkait mengenai proses peramalan dan memastikan keakuratan dari data yang digunakan tersebut.
  c. Memperjelas serta mengkuantitaskan hubungan fungsional yang terdapat diantara variabel-variabel independen dengan permintaan layanan udara.
  d. Melakukan analisis data statistik berupa analisis korelasi, analisis faktor, serta analisis regresi linear dan nonlinear.
  e. Melakukan pengamatan dan evaluasi terhadap perkembangan kondisi di lokasi yang sebenarnya dengan hasil permodelan peramalan yang diperoleh

- Menganalisis beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin kemudian dilakukan perhitungan emisivitas sesuai dengan hasil peramalan aktivitas penerbangan dan kandungan karbon. Pada analisis ini digunakan rumus perhitungan beban emisi karbon di Bandar Udara Sultan Hasanuddin dengan cara mengalikan total konsumsi bahan bakar dengan faktor emisi dan beban polutan. Guna menghitung emisi pada saat LTO juga bisa dihitung dengan jumlah pesawat saat melakukan LTO dikalikan faktor emisi LTO. Pada Gambar 2.1 diketahui bahwa kondisi LTO terjadi saat pesawat berada di bawah 1000 m yaitu saat pesawat *landing*, *taxi* atau *idle*, dan *take off*.

3.5 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan yang dihasilkan berupa hasil analisis perhitungan beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin akibat pola pergerakan pesawat serta arah persebarannya. Adapun saran yang diberikan adalah usulan yang berkaitan dengan hasil analisis.

3.6 Bagan Alir Penyusun Tugas Akhir

Berikut merupakan langkah-langkah yang perlu dilakukan guna menyelesaikan tugas akhir analisis pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon di Bandar Udara Sultan Hasanuddin yang dijelaskan melalui bagan diagram alir pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Diagram Alir Penyelesaian Tugas Akhir

Working Stage	Input	Detail Stage	Output
TAHAP 1 **Pendahuluan** • Diperlukan studi terkait pola pergerakan pesawat serta lingkungan dan pencemaran udara di Bandar Udara Sultan Hasanuddin	Data yang diperlukan: • Data pola pergerakan dan tipe pesawat • Data angin • Data jumlah penumpang • Data konsumsi bahan bakar maksimal • Data pertumbuhan penduduk di Kota Makassar	Mulai Identifikasi masalah Studi Literatur Pengumpulan Data	Rumusan Masalah Metodologi Data Sekunder
TAHAP 2 **Analisis pola pergerakan pesawat di Bandar Udara Sultan Hasanuddin** • Mencari pergerakan pesawat • Mencari tipe pesawat yang beroperasi	Data yang diperlukan: • Data pergerakan pesawat tahun 2014 – 2019 yang diperoleh dari PT. Angkasa Pura I • Data tipe pesawat yang beroperasi	Pengolahan data pola pergerakan pesawat tahun 2014 - 2019 di Bandar Udara Sultan Hasanuddin A	Mengetahui intensitas dan jarak terbang serta tipe pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin

Tabel 3. 1 (Lanjutan)

Working Stage	Input	Detail Stage	Output
		A	
TAHAP 3 **Analisis kontribusi setiap tipe pesawat terhadap emisi karbon** • Mencari tipe mesin pesawat yang beroperasi	Data yang diperlukan: • Data pola pergerakan dan tipe pesawat di Bandar Udara Sultan Hasanuddin	Penentuan tipe mesin yang digunakan oleh setiap tipe pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin	Mengetahui setiap tipe mesin pesawat yang beroperasi
TAHAP 4 **Analisis *payload* pesawat yang beroperasi** • Mencari nilai berat pesawat tanpa bahan bakar	Data yang diperlukan: • Data pergerakan pesawat yang beroperasi • Data jarak tempuh setiap rute penerbangan • Data berat pesawat yang dianalisis	Analisis *payload* menggunakan *payload-range graph* B	Mengetahui nilai berat pesawat tanpa bahan bakar

Tabel 3. 1 (Lanjutan)

Working Stage	Input	Detail Stage	Output
		B	
TAHAP 5 **Analisis total berat aktual pesawat saat *take off*** • Mencari berat maksimum pesawat *take off standart* • Mencari kapasitas bahan bakar maksimal • Mencari nilai BFE	Data yang diperlukan: • Data pola pergerakan pesawat • Data jarak tempuh penerbangan • Data *Zero Fuel Weight* • Data *Maximum Take off Weight* • Data kapasitas bahan bakar maksimal	Menghitung nilai *Block Fuel Estimate* dan berat aktual pesawat saat *take off*	Mengetahui nilai berat pesawat saat *take off*
TAHAP 6 **Analisis total gaya dorong pada pesawat** • Mencari nilai gaya dorong atau *thrust*	Data yang diperlukan: • Data pergerakan pesawat • Data berat pesawat saat *take off* • Data *thrust statis* setiap tipe pesawat • Data tipe mesin setiap pesawat	Menghitung *thrust* atau gaya dorong pada pesawat C	Mengetahui nilai *thrust* atau gaya dorong setiap tipe pesawat

Tabel 3. 1 (Lanjutan)

Working Stage	Input	Detail Stage	Output
		C	
TAHAP 7 **Analisis beban emisi karbon pesawat per unit** • Mencari rasio dan konsumsi bahan bakar riil • Mencari beban emisi karbon per unit pesawat	Data yang diperlukan: • Data pola pergerakan dan tipe mesin pesawat • Data nilai total *thrust* • Data *specific fuel consumption* • Data faktor emisi • Data *Block Fuel Estimate*	Menghitung nilai konsumsi dan rasio bahan bakar riil serta beban emisi pesawat per unit	Mengetahui nilai beban emisi pesawat per unit
TAHAP 8 **Analisis laju pertumbuhan aktivitas penerbangan** • Mencari laju aktivitas penerbangan dengan peramalan	Data yang diperlukan: • Data pergerakkan pesawat • Data pertumbuhan penduduk	Menghitung laju aktivitas penerbangan dengan metode ekonometri dan *exponential smoothing* D	Mengetahui nilai pertumbuhan penduduk terhadap layanan penerbangan

Tabel 3. 1 (Lanjutan)

Working Stage	Input	Detail Stage	Output
		D	
TAHAP 9 **Analisis beban emisi karbon pesawat** • Mencari emisi karbon semua pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin	Data yang diperlukan: • Data pola pergerakan pesawat • Data pertumbuhan penduduk terhadap layanan penerbangan pada periode analisis	Menghitung beban emisi karbon yang tersebar di Bandar Udara Sultan Hasanuddin	Mengetahui beban emisi karbon yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin
TAHAP 10 **Analisis arah angin** • Mencari persebaran emisi karbon sesuai dengan arah angin dominan	Data yang diperlukan: • Data pergerakan pesawat yang beroperasi • Data arah angin • Data beban emisi karbon	Menghitung nilai arah angin dominan dan persebaran emisinya Selesai	Mengetahui arah angin dominan dan persebaran beban emisi karbon yang terjadi

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil dari pengumpulan data dan pengolahan data setelah proposal disetujui. Secara garis besar guna menyelesaikan tugas akhir tentang analisis pola pergerakan pesawat terhadap beban emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin ada tiga tahap yang perlu dilakukan, antara lain: analisis setiap jenis pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin terhadap emisi karbon di bandar udara tersebut, peramalan pergerakan pesawat yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin menggunakan metode ekonometri, dan permodelan emisi karbon total di Bandar Udara Sultan Hasanuddin akibat pertumbuhan pergerakan penumpang serta arah persebarannya.

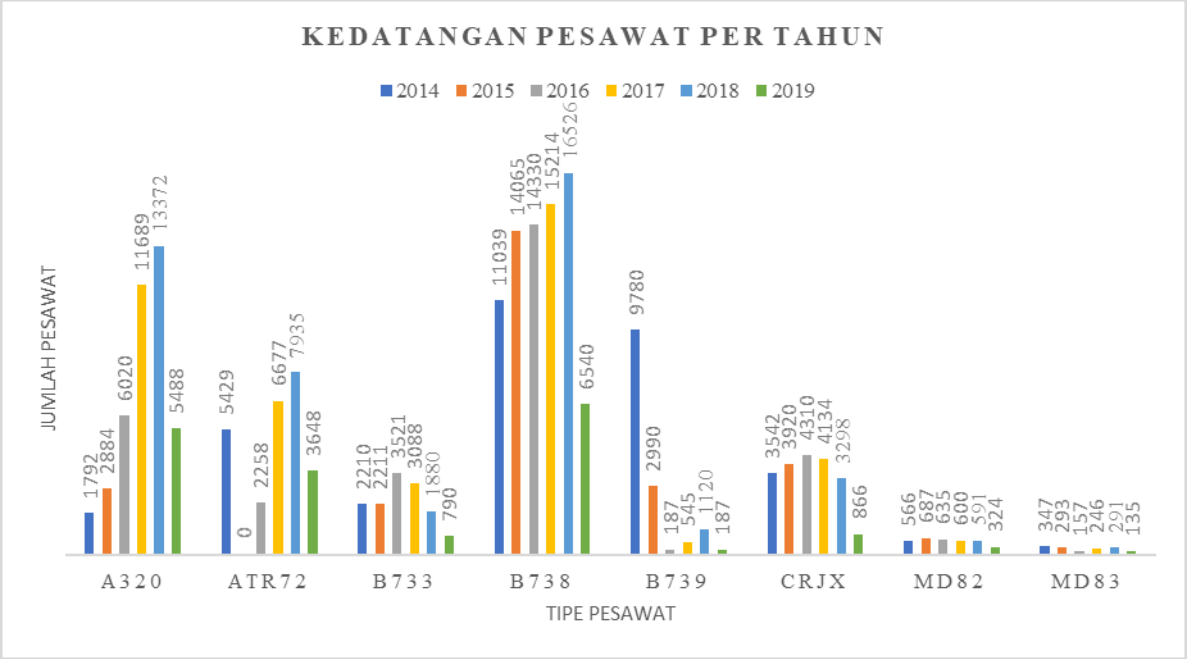
4.1 Analisis Beban Emisi Setiap Jenis Pesawat

Guna menganalisis beban emisi karbon setiap jenis pesawat, terlebih dahulu mengetahui jenis pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin beserta spesifikasinya. Spesifikasi yang dimaksud adalah tipe mesin atau *engine* yang dipakai oleh masing-masing tipe pesawat guna mengetahui kinerja pembakaran bahan bakar yang menghasilkan emisi karbon di bandar udara tersebut.

Setelah mengetahui setiap jenis pesawat beserta spesifikasinya, dibutuhkan data jarak penerbangan minimal, maksimal, dan rerata yang ditempuh oleh setiap jenis pesawat. Data jarak penerbangan ini dibutuhkan karena tidak semua pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin selalu mengudara dalam keadaan terisi penuh (*fully loaded*), oleh karena itu diperlukan data jarak penerbangan setiap jenis pesawat guna memprakirakan jumlah bahan bakar yang digunakan. Data jarak penerbangan setiap jenis pesawat ini, selain untuk memprakirakan kebutuhan bahan bakar juga digunakan untuk menentukan berat operasional pesawat melalui *payload graph*.

Setalah dilakukan analisis terhadap *payload graph*, selanjutnya melakukan analisis terhadap *thrust* atau gaya dorong pesawat. Analisis gaya dorong ini diperlukan guna mengetahui bahan bakar yang digunakan saat pesawat mengudara di Kawasan Keselamatan Operasi Penerbangan (KKOP) – *Imaginary Surface* yang merupakan ruang udara Bandar Udara Sultan Hasanuddin.

Analisis pergerakkan pesawat dilakukan pada beberapa tipe pesawat penumpang di Bandar Udara Sultan Hasanuddin, antara lain: Airbus A320, Alenia ATR-72, Boeing 733-300, Boeing 737-800, Boeing 737-900, Bombardier Aerospace CRJ 1000, Mcdonnell Douglas MD-82, dan Mcdonnell Douglas MD-83. Hanya beberapa tipe pesawat diatas yang dianalisis karena berdasarkan data pergerakan pesawat harian pada tanggal 1 Juli 2019 sampai dengan 8 Juli 2019. Oleh karena itu, analisis beban emisi karbon per unit akan dimodelkan pada pesawat-pesawat tersebut. Berikut merupakan grafik kedatangan pesawat per tahun yang akan di analisis seperti terlihat pada Gambar 4.1. Guna melihat data kedatangan pesawat per tahun yang beroperasional di Bandar Udara Sultan Hasanuddin secara keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran 1.



Gambar 4. 1 Grafik Kedatangan Pesawat A320, ATR72, B733, B738, B739, CRJX, MD82, dan MD83 Per Tahun

Keterangan:
A320 = Airbus A320
ATR72 = Alenia ATR-72
B733 = Boeing 733-300
B738 = Boeing 733-800
B739 = Boeing 733-900
CRJX = Bombardier Aerospace CRJ 1000
MD82 = Mcdonnell Douglas MD-82
MD83 = Mcdonnell Douglas MD-83

Setelah setiap tipe pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin diketahui, selanjutnya dapat diketahui tipe mesin atau *engine* yang digunakan oleh masing-masing pesawat tersebut. Spesifikasi mesin pesawat atau *engine* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Spesifikasi Mesin Pesawat yang Beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin

Tipe Pesawat	Mesin Pesawat
A-320	CFM56-5
ATR-72	PW127 F/M
B-733	CFM56-3
B-738	CFM56-7
B-739	CFM56-7
CRJX	CF34-8C5A2
MD-82	JT8D-217C
MD-83	JT82-219

Setelah mengetahui spesifikasi mesin dari setiap pesawat yang akan dianalisis, selanjutnya adalah menentukan jarak terbang yang ditempuh oleh masing-masing pesawat tersebut karena setiap jenis pesawat memiliki banyak rute penerbangan dan jarak penerbangan yang berbeda seperti yang tercantum pada Lampiran 2. Dengan banyaknya rute penerbangan yang ditempuh oleh setiap tipe pesawat, maka digunakan tiga pilihan jarak, antara lain:

minimum, maksimum, dan rerata. Satuan yang dipakai dalam pengukuran jarak setiap rute penerbangan adalah *Nautical Miles* (NM) dengan faktor pengali sebesar 0.54 terhadap satuan kilometer (Km). Hasil analisis jarak setiap rute penerbangan yang ditempuh oleh setiap tipe pesawat dapat dilihat pada Tabel 4.2 seperti dibawah ini.

Tabel 4. 2 Jarak Tempuh Pesawat yang Beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin

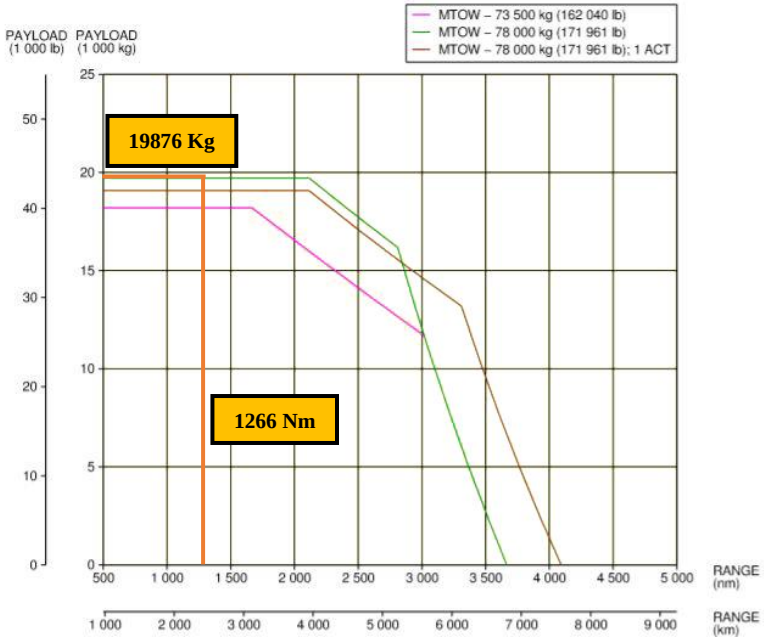
Tipe Pesawat	**Jarak Satuan (NM)**		
	Minimal	**Maksimal**	**Rerata**
A-320	181.44	1266	657.44
ATR-72	134.41	518	226.54
B-733	302.94	906	636.88
B-738	181.44	1266	659.47
B-739	248.40	775	462.49
MD-82	426.62	1038	732.27
MD-83	774.36	1039	906.66
CRJX	148.13	747	470.79

Jarak yang digunakan dalam analisis *payload*

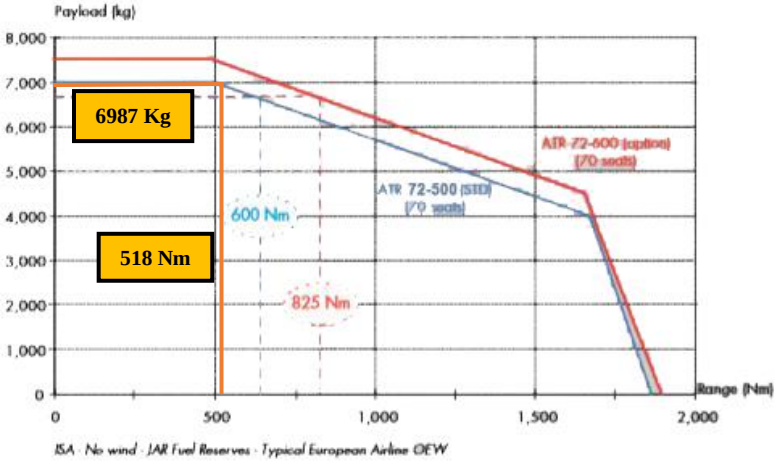
Digunakan jarak tempuh pesawat maksimal karena merupakan jarak yang paling kritis. Jarak tempuh pesawat maksimal dapat mempengaruhi kebutuhan bahan bakar dari setiap tipe pesawat, semakin jauh jarak tempuh pesawat maka jumlah bahan bakar yang diangkut akan lebih besar dibandingkan pesawat yang menempuh jarak dekat atau relatif pendek.

Setelah jarak tempuh maksimal pesawat saat terbang diketahui, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis *payload* dan bahan bakar pesawat. Analisis *payload* dilakukan dengan menggunakan *payload-range graph* dari setiap jenis pesawat. Dalam analisis *payload-range*, yang termasuk dalam hasil pembacaan grafik adalah berat pesawat tanpa bahan bakar (*Zero Fuel Weight*). Dalam *payload-range* diagram terdapat jarak

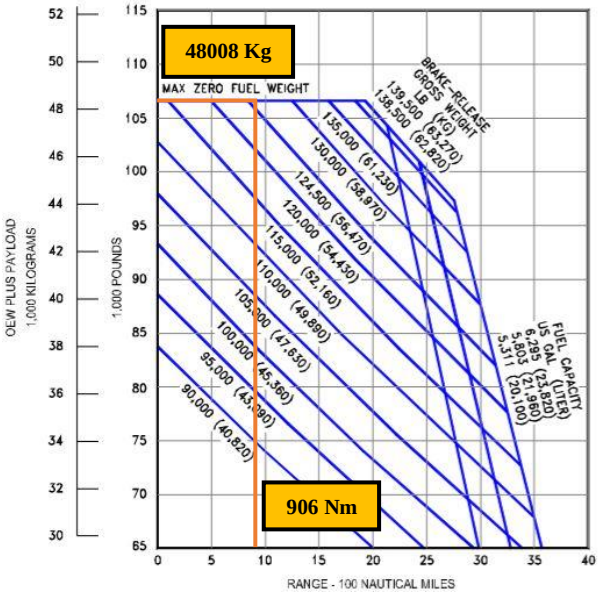
tempuh penerbangan (*flight range*) pada sumbu x dan berat pesawat *(payload*) pada sumbu y, dengan menarik garis secara vertikal pada jarak tempuh penerbangan (sumbu x) hingga memotong grafik, maka akan didapatkan nilai dari berat pesawat pada sumbu y yang bersesuaian. Gambar 4.2 sampai dengan 4.8 menjelaskan penggunaan *payload-range graph* pada setiap tipe pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin guna mendapatkan nilai *payload* (berat pesawat dalam kondisi *Zero Fuel Weight*) yang dihubungkan dengan jarak tempuh penerbangan (*flight range*).



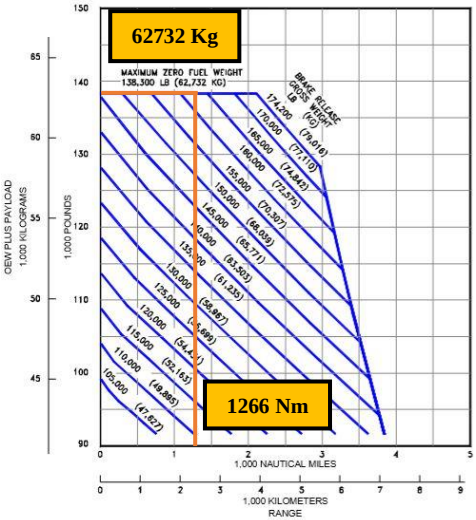
Gambar 4. 2 Grafik *Payload-Range* Pesawat A-320



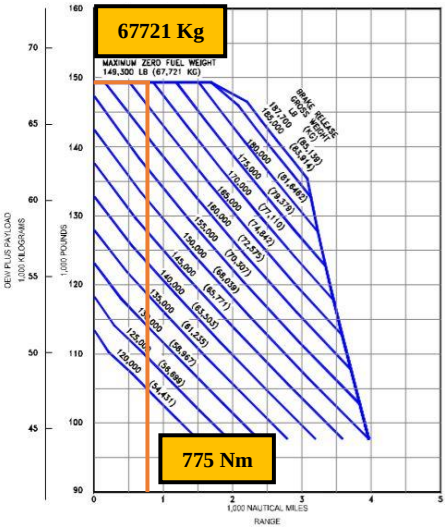
Gambar 4. 3 Grafik *Payload-Range* Pesawat ATR-72



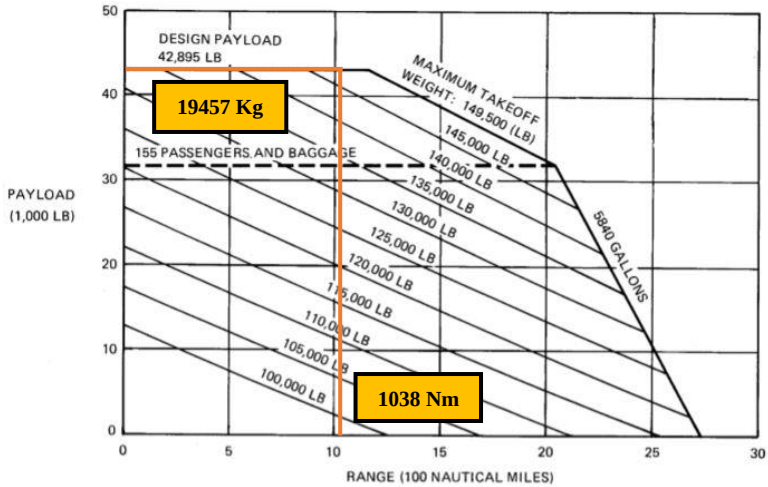
Gambar 4. 4 Grafik *Payload-Range* Pesawat B-733



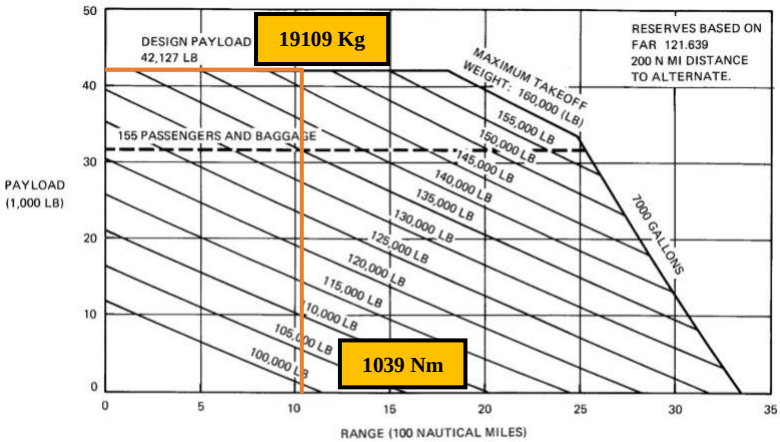
Gambar 4. 5 Grafik *Payload-Range* Pesawat B-738



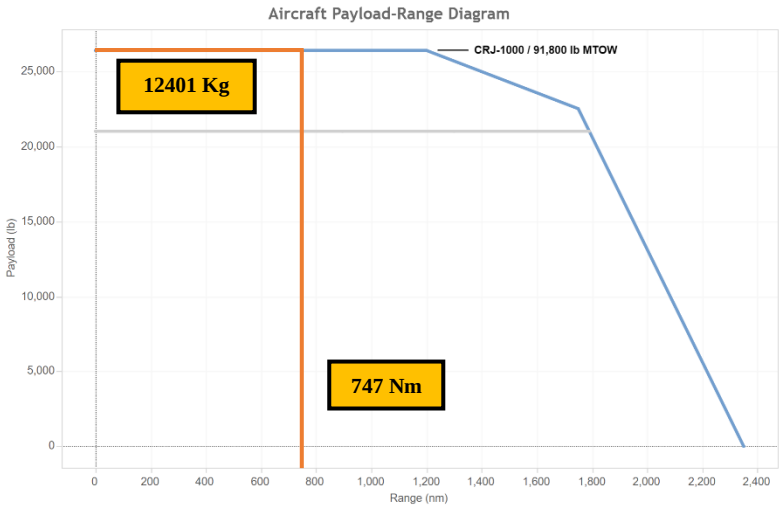
Gambar 4. 6 Grafik *Payload-Range* Pesawat B-739



Gambar 4. 7 Grafik *Payload-Range* Pesawat MD-82

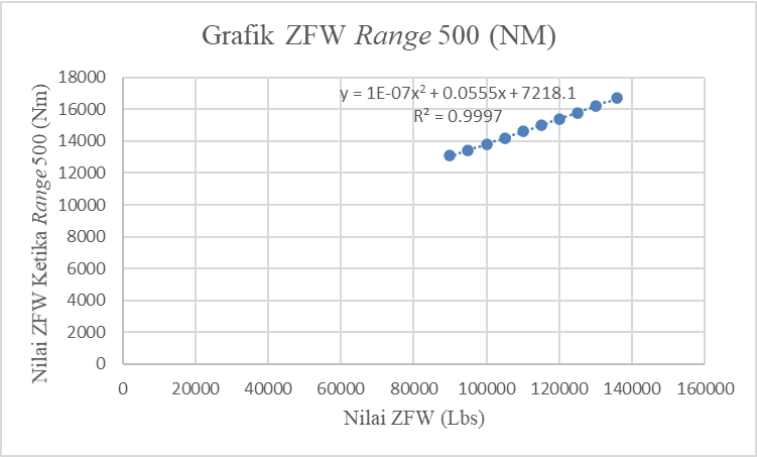


Gambar 4. 8 Grafik *Payload-Range* Pesawat MD-83



Gambar 4. 9 Grafik *Payload-Range* Pesawat CRJX

Setelah melakukan analisis *payload*, maka didapatkan nilai *Zero Fuel Weight* (ZFW). ZFW digunakan untuk mengetahui detail kebutuhan bahan bakar pada saat pesawat menempuh masing-masing jarak penerbangan dengan menggunakan tabel *Block Fuel Estimate* (BFE) seperti yang terlihat pada Tabel 4.3. Jika nilai yang diinginkan tidak tercantum pada Tabel 4.3, maka harus dilakukan regresi dan interpolasi seperti terlihat pada Tabel 4.4. Interpolasi guna mendapatkan nilai ZFW yang diinginkan dilakukan dengan cara membuat grafik hubungan antara nilai ZFW (Lbs) dan *range* (NM), setelah itu dilakukan regresi linear guna mendapatkan persamaan tersebut dan memasukkan nilai ZFW yang dicari kedalam persamaan tersebut. Setelah memasukkan nilai ZFW yang dicari kedalam persamaan, langkah selanjutnya adalah melakukan interpolasi antara nilai ZFW yang ingin dicari sesuai dengan *range* yang diketahui. Contoh grafik dan persamaan linear seperti terlihat seperti Gambar 4.10 dibawah ini.



Gambar 4. 10 Grafik ZFW Pada *Range* 500 (NM)

Tabel 4. 3 *Block Fuel Estimate*

ZFW (Lb)	Range (NM)				
	500	**1000**	**1500**	**2000**	**2500**
90000	13100	17600	22300	27100	32000
95000	13400	18100	23000	27900	33000
100000	13800	18600	23600	28800	34000
105000	14200	19200	24300	29600	35100
110000	14600	19800	25100	30500	36300
115000	15000	20300	25800	31500	37400
120000	15400	20900	26600	32500	38700
125000	15800	21500	27400	33600	39900
130000	16200	22200	28300	34600	41100
136000	16700	22800	29100	35800	42400

(Sumber: Pyatt, 2009)

Tabel 4. 4 *Block Fuel Estimate* Setelah Dilakukan Regresi Linear

ZFW (Lb)	**Range (NM)**				
	500	**1000**	**1500**	**2000**	**2500**
10000	7783	10546	14290	18422	17952
15000	8073	10904	14642	18724	18656
20000	8368	11272	15013	19061	19380
25000	8668	11650	15405	19433	20124
30000	8973	12038	15816	19840	20888
35000	9283	12436	16248	20282	21672
40000	9598	12844	16699	20759	22476
45000	9918	13262	17171	21271	23300
50000	10243	13690	17662	21818	24144
55000	10573	14128	18174	22400	25008
60000	10908	14576	18705	23017	25892
65000	11248	15034	19257	23669	26796
70000	11593	15502	19828	24356	27720
75000	11943	15980	20420	25078	28664
80000	12298	16468	21031	25835	29628
85000	12658	16966	21663	26627	30612
90000	13100	17600	22300	27100	32000
95000	13400	18100	23000	27900	33000
100000	13800	18600	23600	28800	34000
105000	14200	19200	24300	29600	35100
110000	14600	19800	25100	30500	36300
115000	15000	20300	25800	31500	37400
120000	15400	20900	26600	32500	38700
125000	15800	21500	27400	33600	39900
130000	16200	22200	28300	34600	41100
136000	16700	22800	29100	35800	42400
142000	17116	23350	30275	38130	43243
148000	17623	24097	31333	39605	44724
154000	18137	24859	32420	41131	46234

Selain ZFW, data lain yang dibutuhkan untuk menentukan berat aktual pesawat saat *take off* adalah data berat maksimum pesawat *take off* standart atau biasa disebut dengan *Maximum Take Off Weight* (MTOW) serta kapasitas penuh bahan bakar pesawat (*full tank capacity*) untuk menghitung tambahan bahan bakar sebagai syarat keamanan penerbangan oleh NASA sebesar 10% dari kapasitas penuh tangki.

Nilai MTOW didapatkan dari *payload graph* dan brosur spesifikasi setiap tipe pesawat. Nilai ZFW didapatkan dari analisis *payload graph* dengan jarak yang bersesuaian serta regresi linear dan interpolasi pada Tabel 4.4. Perhitungan ZFW menggunakan rumus interpolasi 4.1 dibawah ini.

$$Y = Y1 + \frac{(X - X1)}{(X2 - X1)} \times (Y2 - Y1) \tag{4-1}$$

Dimana:

Y = Nilai BFE yang dicari (Lbs)
Y1 = Nilai ZFW Ketika jarak X1 (Lbs)
Y2 = Nilai ZFW Ketika jarak X2 (Lbs)
X1 = Jarak (*range*) dengan batas bawah satuan (NM)
X2 = Jarak (*range*) dengan batas atas satuan (NM)

Contoh perhitungan nilai BFE tipe pesawat A320 pada jarak (*range*) 1266 NM seperti terlihat pada Tabel 4.5 dibawah ini dan untuk tabel perhitungan tipe pesawat yang lain dapat dilihat pada Lampiran 3 sampai dengan 9.

Tabel 4. 5 Perhitungan ZFW Tipe Pesawat A320

Perhitungan Y ketika ZFW 40000				A320
X1	1000	Y1	12844	
X	1266	Y	14895	
X2	1500	Y2	16699	
Perhitungan Y Ketika ZFW 45000				
X1	1000	Y1	13262	
X	1266	Y	15341	
X2	1500	Y2	17171	
Perhitungan Y Ketika ZFW 43820				
X1	40000	Y1	14895	
X	43820	Y	15682	
X2	45000	Y2	15341	

Dari Tabel 4.5 diatas, maka dapat diketahui nilai BFE pesawat A320 dengan jarak (*range*) 1266 NM dengan nilai ZFE 43820 Lbs adalah 15682 Lbs dengan menggunakan persamaan 4.1. Cara yang sama digunakan untuk mendapatkan nilai BFE pada tipe pesawat ATR72, B733, B738, B739, CRJX, MD82, dan MD83 yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Hasil perhitungan BFE setiap tipe pesawat dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Analisis *Block Fuel Estimate*

Tipe Pesawat	MTOW (Lbs)	*Payload* (Lbs)	
		ZFW	*Block Fuel Estimate* (Lbs)
A-320	171961	43820	15682
ATR-72	50706	15404	8497
B-733	139500	105840	19544
B-738	174200	138300	27372
B-739	187700	149300	21975

Tabel 4. 6 (Lanjutan)

Tipe Pesawat	MTOW (Lbs)	*Payload* (Lbs)	
		ZFW	*Block Fuel Estimate* (Lbs)
MD-82	149500	42895	13803
MD-83	160000	42127	13746
CRJX	94005	27339	10649

Dalam perhitungan berat aktual pesawat saat *take off* dibutuhkan beberapa data, antara lain adalah kapasitas bahan bakar maksimal (*fuel tank capacity*) dan cadangan kapasitas penuh bahan bakar (*reserve fuel capacity*). *Fuel tank capacity* didapatkan dari brosur atau spesifikasi setiap tipe pesawat dan nilai *reserve fuel capcity* didapatkan dari hasi pengalian antara *full tank capacity* dengan 10% dari kapasitas bahan bakar maksimal sesuai dengan syarat penerbangan oleh NASA.

Hasil pengalian *full tank capacity* dengan 10% dari kapasitas bahan bakar maksimal, maka didapatkan nilai total *actual take off weight* pada tipe pesawat yang dianalisis, antara lain: A320, ATR72, B733, B738, B739, CRJX, MD82, dan MD83. Hasil perhitungan total *actual take off weigh*t dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Analisis Total *Actual Take Off Weight*

Tipe Pesawat	*Full Tank Capacity* (Lbs)	*Reserve Fuel Capacity* (Lbs) 10%	*Total Actual Take off Weight* (Lbs)
A-320	52492	5249	20931
ATR-72	14080	1408	9905
B-733	44280	4428	23972
B-738	46063	4606	31979

Tabel 4. 7 (Lanjutan)

Tipe Pesawat	*Full Tank Capacity* (Lbs)	*Reserve Fuel Capacity* (Lbs) 10%	*Total Actual Take off Weight* (Lbs)
B-739	46063	4606	26581
MD-82	48764	4876	18679
MD-83	58199	5820	19566
CRJX	24525	2453	13101

Setelah nilai *total actual take off weight* diketahui, langkah selanjutnya adalah menghitung besarnya *thrust* pada masing-masing tipe pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Ada beberapa data yang dibutuhkan dalam analisis ini, antara lain: berat pesawat saat *take off* yang di dapatkan dari analisis *payload* dan bahan bakar pesawat berupa total *actual take off weight*, luas KKOP Bandar Udara Sultan Hasanuddin yang terdampak saat *take off* yaitu 1000 ft^2 sesuai ketentuan FAA, berat jenis atmosfer konstan yaitu 0.002377 $slug/ft^3$, Koefisien *Lift off* (*Clmax*) yang dimiliki oleh maisng-masing tipe pesawat, kecepatan pesawat baik saat didasar (Vstall) ataupun saat *take off* (Vto), tingkat efisiensi mesin pesawat yang digunakan yaitu 0.75, dan besaran *thrust statis* yang dimiliki oleh masing-masing tipe pesawat. Contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai *thrust* sebagai berikut.

Data yang diketahui adalah pesawat dengan tipe A320 yang menggunakan tipe mesin CFM56-5 (*Twin Engine*), n = 2, S = 1000 ft^2, ρ = 0.002377 $slug/ft^3$, W = 64751 Lbs (*Total Actual Take-off Weight* + ZFW), To (*Thrust statis*) = 24999 Lbs, dan Clmax = 3.

Vstall = $\sqrt{\frac{W}{\frac{1}{2} x \text{ ρ x S x Clmax}}}$

Vstall = $\sqrt{\frac{64751}{\frac{1}{2} x \text{ 0.002377 x 1000 x 3}}}$

Vstall = 134.76 ft/sec

Vto = 1.2 x Vstall

Vto = 1.2 x 134.76

Vto = 161.71 ft/sec

Thrust = $\frac{T \; x \; \eta p}{Vto}$

Thrust = $\frac{24999 \; x \; 0.75}{161.71}$

Thrust = 115.94 Lbs

Total *Thrust* = *Thrust* x n (mesin yang dipakai)

Total *Thrust* = 115.94 x 2

Total *Thrust* = 231.88 Lbs

Dengan menggunakan metode perhitungan yang sama, maka akan didapatkan nilai *thrust* dari masing-masing tipe pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin. Hasil perhitungan analisis *thrust* pada masing-masing tipe pesawat dapat dilihat pada Tabel 4.8. Setelah nilai *thrust* pada masing-masing jenis pesawat didapatkan, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis konsumsi bahan bakar yang digunakan oleh masing-masing tipe pesawat untuk menghasilkan jumlah *thrust* yang telah dihitung. Analisis konsumsi bahan bakar terhadap *thrust* dapat dilakukan dengan mengalikan total *thrust* dengan faktor *Specific Fuel Consumption* yang dimiliki oleh masing-masing tipe pesawat. Data *Specific Fuel Consumption* dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Setelah mengalikan *Specific Fuel Consumption* dengan analisis nilai total *thurst*, maka akan didapatkan nilai konsumsi bahan bakar riil seperti yang terlihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 8 Analisis Total *Thrust*

Tipe Pesawat	S (ft^2)	ρ ($slug/ft^3$)	Clmax	n	ηp	Vstall (ft/sec)	Vto (ft/sec)	T (Lbs)	To (Lbs)	Total *Thrust* (Lbs)
A-320	1000	0.002377	3	2	0.75	134.76	161.71	24999	115.94	231.88
ATR-72	1000	0.002377	2	2	0.75	103.19	123.82	19500	118.11	236.22
B-733	1000	0.002377	3.28	2	0.75	182.48	218.98	20008	68.53	137.05
B-738	1000	0.002377	3.33	2	0.75	207.42	248.91	24055	72.48	144.96
B-739	1000	0.002377	3.35	2	0.75	210.18	252.21	24200	71.96	143.93
MD-82	1000	0.002377	2.77	2	0.75	136.76	164.11	20840	95.24	190.48
MD-83	1000	0.002377	2.8	2	0.75	136.16	163.39	21672	99.48	198.96
CRJX	1000	0.002377	3.42	4	0.75	99.75	119.69	6992	43.81	87.62

Tabel 4. 9 *Specific Fuel Consumption*

Tipe Pesawat	A-320	ATR-72	B-733	B-738	B-739	CRJX	MD-82	MD-83
SFC	0.33	0.30	0.33	0.36	0.36	0.33	0.52	0.52

Tabel 4. 10 Total Konsumsi Bahan Bakar Riil

Tipe Pesawat	Total *Thrust* (Lbs)	SFC	Konsumsi Bahan Bakar Riil (Lbs)
A-320	231.88	0.33	76.52
ATR-72	236.22	0.30	70.87
B-733	137.05	0.33	45.23
B-738	144.96	0.36	52.19
B-739	143.93	0.36	51.81
CRJX	87.62	0.33	28.92
MD-82	190.48	0.52	99.05
MD-83	198.96	0.52	103.46

Setelah melakukan analisis terhadap total konsumsi bahan bakar riil dan perhitungan *thrust*, selanjutnya adalah menghitung beban emisi masing-masing pesawat per unit dengan mengalikan total *thrust* yang telah didapatkan dari perhitungan dengan *Specific Fuel Consumption* (SFC). Setelah mengalikam total *thrust* dengan *Specific Fuel Consumption*, maka akan diketahui berapa banyak bahan bakar yang terpakai pada saat pesawat terbang keluar dari wilayah Bandar Udara Sultan Hasanuddin.

Setelah mendapatkan total konsumsi bahan bakar yang terpakai oleh masing-masing jenis pesawat, selanjutnya adalah mengalikan jumlah bahan bakar yang terpakai dengan kandungan faktor emisi dari zat-zat yang akan dianalisa, yaitu: CO_2, CO, dan HC. Guna melihat faktor emisi untuk masing-masing zat yang dianalisa dapat dilihat pada Tabel 4.11 sesuai dengan yang telah ditetapkan oleh IPCC (*Intergovermental Climate Change*) dalam EFDB (*Emission Factor Database*) untuk bahan bakar *Jet Gasoline*. Berdasarkan data yang telah didapatkan perlu dilakukan konversi satuan dari Kg/LTO (*Kilogram/Landing-Take off*) ke Lbs/LTO (Pounds/ *Landing-Tak eoff*) dengan faktor pengali sebesar 2.2.

Tabel 4. 11 Faktor Emisi (Lbs/LTO)

Tipe Pesawat	Kg/LTO			Lbs/LTO		
	CO_2	CO	CH_4	CO_2	CO	CH_4
A-320	2440	6.19	0.06	5368	13.62	0.13
ATR-72	620	2.33	0.03	1364	5.13	0.07
B-733	2480	13.03	0.08	5456	28.67	0.18
B-738	2780	7.07	0.07	6116	15.55	0.15
B-739	2780	7.07	0.07	6116	15.55	0.15
CRJX	1060	6.70	0.06	2332	14.74	0.13
MD-82	3180	6.46	0.19	6996	14.21	0.42
MD-83	3180	6.46	0.19	6996	14.21	0.42

(Sumber: IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006)

LTO atau yang biasa disebut dengan *Landing Take off* merupakan suatu siklus penerbangan yang dilakukan oleh masing-masing tipe pesawat dan perlu dilakukan koreksi terhadap faktor emisi sesuai dengan rasio konsumsi bahan bakar yang digunakan oleh pesawat tersebut. Koreksi terhadap faktor emisi terhadap rasio konsumsi bahan bakar perlu dilakukan guna perbandingan bahan bakar yang dikonsumsi oleh masing-masing tipe pesawat untuk keluar dari KKOP Bandar Udara Sultan Hasanuddin dengan bahan bakar yang dipakai pesawat dalam menyelesaikan satu siklus LTO dan dapat dilihat pada Tabel 4.12. Nilai *Fuel Ratio* didapatkan dari perbandingan anatara nilai BFE (Lbs) dengan konsumsi bahan bakar riil (Lbs).

Tabel 4. 12 Rasio Bahan Bakar

Tipe Pesawat	*Block Fuel Estimate* (Lbs)	Konsumsi Bahan Bakar Riil (Lbs)	*Fuel Ratio*
A-320	43820	76.52	0.0017
ATR-72	15404	70.87	0.0046
B-733	105840	45.23	0.0004
B-738	138300	52.19	0.0004
B-739	149300	51.81	0.0003
CRJX	27339	28.92	0.0011
MD-82	42895	99.05	0.0023
MD-83	42127	103.46	0.0025

Setelah nilai faktor emisi terhadap rasio konsumsi bahan bakar (*fuel ratio*) diketahui, maka langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan faktor emisi untuk masing-masing pesawat dan senyawa zat yang dianalisa dengan cara mengalikan faktor emisi masing-masing pesawat seperti CO_2, CO, dan HC dengan rasio bahan bakar tersebut. Perhitungan faktor emisi yang dianalisa dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Faktor Emisi

Tipe Pesawat	*Fuel Ratio*	Faktor Emisi (Lbs)		
		CO_2	CO	HC
A-320	0.0017	9.5001	0.0241	0.0002
ATR-72	0.0046	5.8482	0.0220	0.0003
B-733	0.0004	2.3390	0.0123	0.0001
B-738	0.0004	2.5802	0.0066	0.0001
B-739	0.0003	2.1267	0.0054	0.0001
CRJX	0.0011	1.1444	0.0072	0.0001
MD-82	0.0023	16.2629	0.0330	0.0010
MD-83	0.0025	17.2949	0.0351	0.0010

Berdasarkan hasil perhitungan analisis *thrust* yang menghasilkan nilai konsumsi bahan bakar riil dan faktor emisi

maisng-masing pesawat, maka dapat dilakukan perhitungan beban emisi oleh masing-masing tipe pesawat dengan mengalikan total konsumsi bahan bakar riil dengan faktor emisi dan beban polutan. Beban polutan dalam pembakaran bahan bakar *jet gasoline* sehingga diperoleh beban CO_2, CO, dan HC pada masing-masing jenis pesawat dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Beban Polutan

Tipe Pesawat	*Engine*	*Type*	Beban (Lbs/H)		
			CO_2	CO	HC
A-320	CFM56-5	*Twin Engine Turbofan*	27900	3	2.4
ATR-72	PW127 F/M	*Twin Engine Turboprop*	6800	3.6	0.3
B-733	CFM56-3	*Twin Engine Turbofan*	27900	3	2.4
B-738	CFM56-7	*Twin Engine Turbofan*	27900	3	2.4
B-739	CFM56-7	*Twin Engine Turbofan*	27900	3	2.4
CRJX	CF34-8C5A2	*Twin Engine Turbofan*	27900	3	2.4
MD-82	JT8D-217C	*Twin Engine Turbofan*	27900	3	2.4
MD-83	JT82-219	*Twin Engine Turbofan*	27900	3	2.4

(Sumber: Lozano et al, 2012)

Setelah diketahui data beban polutan dalam (Lbs/*Hour*), langkah selanjutnya adalah mengetahui nilai durasi penerbangan dengan cara membagi nilai konsumsi bahan bakar riil masing-masing pesawat dengan konsumsi rasio bahan bakar. Hasil perhitungan dari nilai durasi penerbangan dapat dilihat pada Tabel 4.15. Nilai durasi terbang didapatkan dari perbandingan antara konsumsi bahan bakar riil dengan konsumsi rasio bahan bakar.

Tabel 4. 15 Durasi Penerbangan

Tipe Pesawat	Konsumsi Bahan Bakar Riil (Lbs)	Konsumsi Rasio Bahan Bakar (Lbs/H)	Durasi Terbang (*Hour*)
A-320	76.52	18660	0.004
ATR-72	70.87	7476	0.009
B-733	45.23	20969	0.002
B-738	52.19	16738	0.003
B-739	51.81	27343	0.002
CRJX	28.92	14447	0.002
MD-82	99.05	20672	0.005
MD-83	103.46	24648	0.004

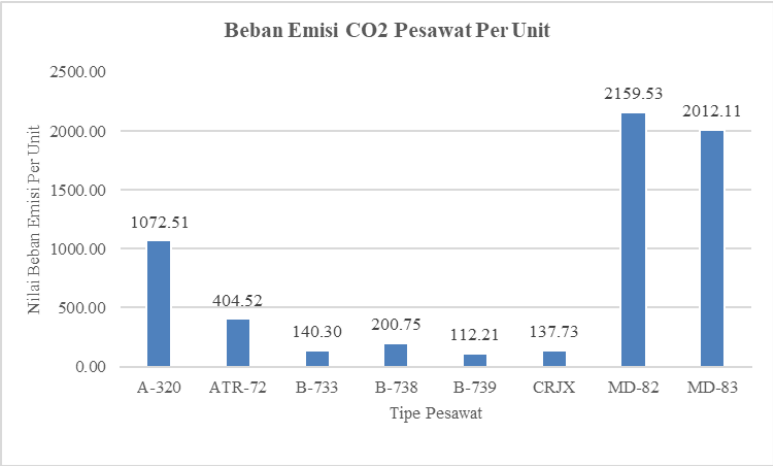
Setelah nilai durasi terbang masing-masing jenis pesawat diketahui, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap beban polutan masing-masing tipe pesawat. Analisis ini dilakukan dengan cara mengalikan nilai durasi terbang pada Tabel 4.15 dengan beban dan faktor emisi masing-masing zat yang dianalisis pada Tabel 4.14. Hasil perhitungan beban emisi per unit dapat dilihat pada Tabel 4.16

Tabel 4. 16 Beban Emisi Per Unit

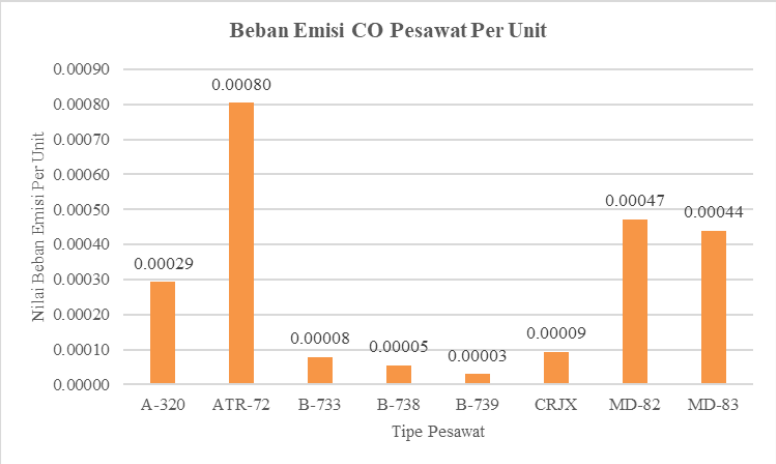
Tipe Pesawat	Beban Emisi Per Unit (Lbs)		
	CO_2	CO	HC
A-320	1072.51	0.00029	0.0000023
ATR-72	404.52	0.00080	0.0000009
B-733	140.30	0.00008	0.0000004
B-738	200.75	0.00005	0.0000004
B-739	112.21	0.00003	0.0000002
CRJX	137.73	0.00009	0.0000007
MD-82	2159.53	0.00047	0.0000111
MD-83	2012.11	0.00044	0.0000103

Setelah diketahui beban emisi pesawat per unit pada masing-masing senyawa yang di analisa, langkah selanjutnya

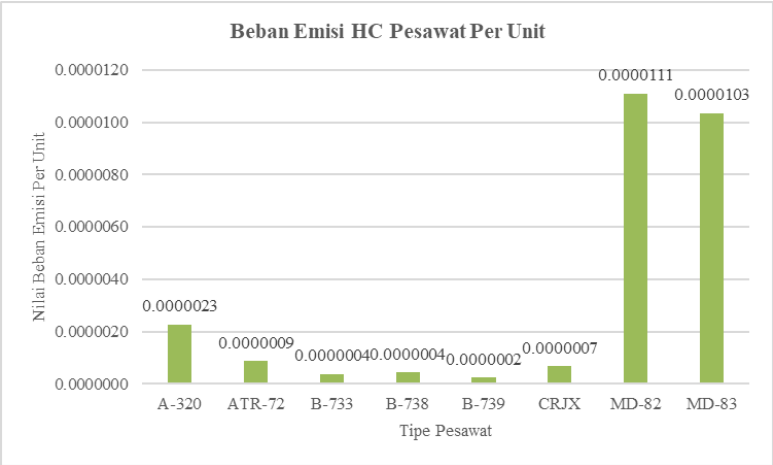
adalah membuat grafik agar memudahkan dalam pembacaan emisi masing-masing senyawa seperti CO_2, CO, dan HC terhadap setiap tipe pesawat yang di analisis seperti yang terlihat pada Gambar 4.11 sampai dengan 4.13.



Gambar 4. 11 Grafik Beban Emisi CO_2 Pesawat Per Unit



Gambar 4. 12 Grafik Beban Emisi CO Pesawat Per Unit



Gambar 4. 13 Grafik Beban Emisi HC Pesawat Per Unit

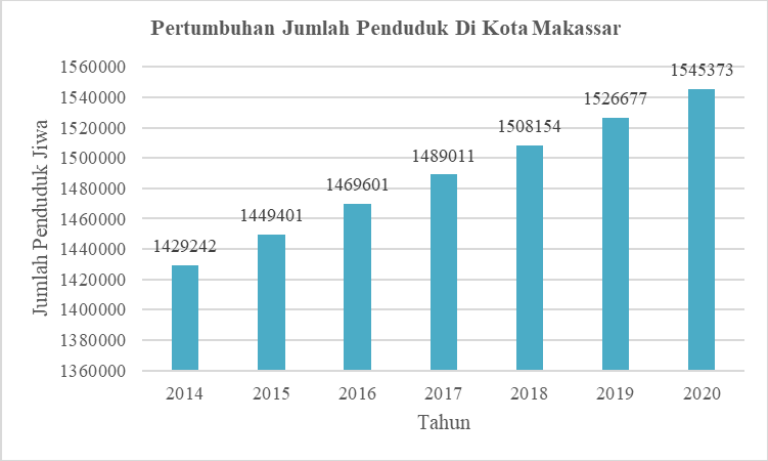
Berdasarkan hasil yang didapatkan dari Gambar 4.8 sampai dengan 4.10, diketahui bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara beban emisi CO_2, CO, dan HC. Perbedaan ini disebabkan karena CO_2 dikategorikan sebagai pencemar udara (polutan) dalam kehidupan sehari-hari. Zat CO_2 juga mempunyai efek negatif yang berbahaya pada lapisan ozon bumi jika terakumulasi terus-menerus dalam jumlah besar. Untuk senyawa CO dan HC juga menyebabkan dampak yang buruk bagi mahkluk hidup dan lingkungan disekitar area bandar udara Sultan Hasanuddin jika terdampak terus-menerus dan terakumulasi dalam jumlah besar.

Dari grafik beban emisi pesawat per unit dapat dilihat bahwa tipe pesawat MD-82 dan MD-83 mempunyai nilai beban emisi per unit yang sangat besar dikarenakan tipe mesin yang dipakai oleh pesawat tersebut hanya mempunya nilai *bypass ratio* sebesar 1.8, sedangkan nilai *bypass ratio* dari pesawat lainnya sebesar 5 – 6.4 sehingga berpengaruh besar pada nilai beban emisi pesawat per unit. Nilai *bypass ratio* sangat berpengaruh karena jika nilainya semakin besar, maka konsumsi bahan bakar yang

diperlukan oleh pesawat lebih kecil dibandingkan dengan pesawat yang memiliki nilai *bypass ratio* rendah.

4.2 Peramalan Penerbangan Metode Ekonometri

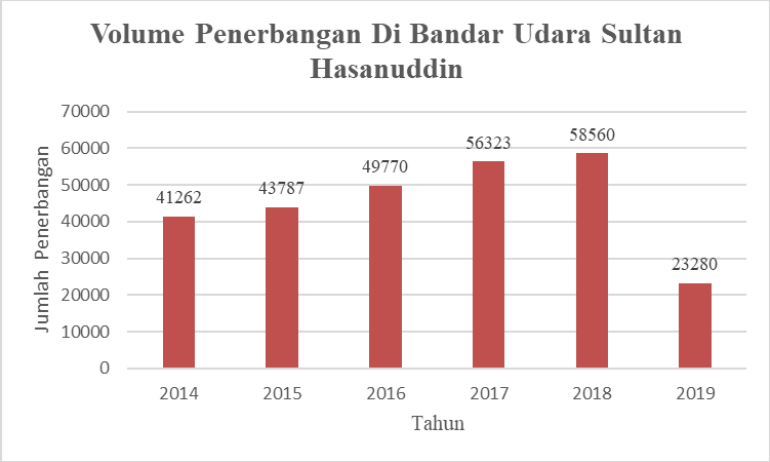
Peramalan dengan metode ekonometri secara garis besar sama dengan metode lainnya, namun yang membedakan adalah ekonometri menggunakan data historis dengan melibatkan faktor ekonomi dan sosial yang mungkin berpengaruh pada objek yaitu penerbangan. Data yang digunakan salah satunya ada data jumlah pertumbuhan penduduk di Kota Makassar yang didapatkan dari Badan Pusat Statistika (BPS) pada tahun 2014 – 2020 seperti yang terlihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Grafik Pertumbuhan Jumlah Penduduk di Kota Makassar pada tahun 2014 – 2019
(Sumber: Badan Pusat Statistika Kota Makassar)

Setelah mendapatkan data pertumbuhan jumlah penduduk di Kota Makassar, selanjutnya dilakukan peramalan penerbangan total dan volume penerbangan untuk masing-masing pesawat hingga tahun 2034 (15 tahun umur rencana), berdasarkan data pergerakkan pesawat pada tahun 2014 sampai dengan 2018.

Meskipun data yang diperoleh hingga tahun 2019, akan tetapi data tahun 2019 tidak dipakai dan tidak masuk kedalam peralaman karena data di tahun 2019 hanya sampai bulan juni atau tidak penuh selama satu tahun. Selain itu, karena beban emisi yang dikandung oleh pesawat berbeda-beda, sehingga hasil akan lebih akurat jika diketahui volume penerbangan dari masing-masing pesawat. Jumlah volume penerbangan periode rencana dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Grafik Volume Penerbangan Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diketahui bahwa dengan tingkat akurasi sebesar 90% dan error (α) sebesar 10%, diperoleh hasil analisis korelasi pada Tabel 4.17 sampai dengan 4.19 melalui software SPSS versi 26.

Tabel 4. 17 Pengaruh Regresi Ekonometri Setiap Variabel Terhadap Jumlah Penerbangan

Model		*Unstandardized Coefficients*		*Standardized Coefficients*	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Constant	-264983.922	439767.872		-.603	.608
	Pertumbuhan Penduduk (X1)	.209	.362	.865	.578	.621
	Penghasilan Per Kapita (X2)	7.776E-11	.000	.122	.082	.942

(Sumber: Software SPSS Versi 26)

Tabel 4. 18 Hasil Regresi Ekonometri Pertumbuhan dan Penghasilan Per Kapita Penduduk Terhadap Jumlah Penerbangan

Model		*Sum of Squares*	df	*Mean Square*	F	Sig.
1	Regression	222224654.1	2	111112327.1	36.924	.026[b]
	Residual	6018427.065	2	3009213.533		
	Total	228243081.2	4			

(Sumber: Software SPSS Versi 26)

Tabel 4. 19 Pengaruh Regresi Ekonometri Pertumbuhan dan Pendapatan Per Kapita Penduduk Di Kota Makassar Terhadap Jumlah Penerbangan

Model	R	R Square	*Adjusted R Square*	*Std. Error of the Estimate*
1	.987[a]	.974	.947	1734.708

(Sumber: Software SPSS Versi 26)

0.621 (Sig > 0.1 = Tidak Signifikan)
0.942 (Sig > 0.1 = Tidak Signifikan)
0.026 (Sig < 0.1 = Signifikan)
0.987 (98.7% mempengaruhi variabel Y)

Berdasarkan analisis regresi ekonometri, pertumbuhan dan pendapatan per kapita penduduk di Kota Makassar tidak mempengaruhi jumlah volume penerbangan di Bandar Udara Sultan Hasanuddin dengan nilai signifikansi (Sig) masing-masing sebesar 0.621 dan 0.942, dimana nilai tersebut lebih besar dari batas izin (10%). Akan tetapi, jika pertumbuhan penduduk yang diiringi dengan penigkatan penghasilan per kapita, maka secara statistik dapat mempengaruhi jumlah volume penerbangan total di Bandar Udara Sultan Hasanuddin secara signifikan dengan nilai signifikansi (Sig) sebesar 0.026 yang kurang dari batas izin (10%). Dapat disimpulkan, bahwa pertumbuhan penduduk yang diiringi dengan penigkatan penghasilan per kapita di Kota Makassar sangat mempengaruhi jumlah volume penerbangan di Bandar Udara Sultan Hasanuddin sebesar 98.7% dan 1.3% jumlah volume penerbangan dipengaruhi oleh faktor-faktor lain. Oleh karena itu, digunakan peramalan dengan pengaruh pertumbuhan penduduk dan pendapatan per kapita sebagai peubah dan didapatkan rumus regresi linear ekonometri seperti yang terlihat pada rumus 4-2 dengan nilai -300784.680, 0.209, dan 7.6E-11 didapatkan dari analisis software SPSS yang telah dilakukan. Nilai ε adalah distribusi probabilitas atau dianggap sebagai pengganti variabel-variabel berpengaruh lain, selain variabel yang dijelaskan dalam

model. Dalam teori ekonomi, ε merupakan representasi dari asumsi ceteris paribus yaitu pengakuan adanya variabel lain yang berpengaruh, meskipun tidak disebutkan variabelnya tetapi cukup ditulis dengan tanda ε, maka model menjadi lebih realistik.

$$\text{Volume Penerbangan} = -264983.922 + (0.209 \times \text{Penduduk}) + (7.776E\text{-}11 \times \text{Pendapatan}) + \varepsilon \quad (4\text{-}2)$$

Akan tetapi, faktor penghasilan per kapita dan jumlah pertumbuhan penduduk tidak dapat digunakan untuk meramalkan jumlah volume penerbangan masing-masing tipe pesawat karena memiliki hasil yang acak dan tidak signifikan serta berubah-ubah. Hal ini diduga karena faktor pemilihan setiap tipe pesawat yang akan digunakan dalam penerbangan tidak sepenuhnya dipengaruhi oleh kondisi sosio-ekonomi masyarakat di Kota Makassar, akan tetapi melibatkan faktor lain yang lebih signifikan pengaruhnya, seperti keputusan maskapai penerbangan dan peraturan pemerintah.

Dengan hasil yang acak dari metode diatas, maka penulis terlebih dahulu melakukan peramalan jumlah pertumbuhan penduduk sebagai masukan untuk melakukan analisis ekonometri. Dengan peramalan menggunakan metode *double exponential smooting*, hanya melibatkan data historis tanpa faktor pengaruh lain untuk menganalisis jumlah perumbuhan penduduk.

Guna meramalkan jumlah pertumbuhan penduduk dengan metode double *exponential smoothing*, terlebih dahulu ditetapkan nilai $\alpha = 0.2$ dan $\beta = 0.3$ agar hasil peramalan lebih akurat. Di bawah ini merupakan hasil perhitungan metode *double exponential smoothing* dengan menggunakan *software* microsoft excel seperti yang terlihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Peramalan Jumlah Pertumbuhan Penduduk Di Kota Makassar Hingga Tahun 2034

Periode	Penduduk	Lt	Tt	h	F (t + h)
0		1411327	19310.5		
1	1429242	1430358	19226.8	1	1430637
2	1449401	1449548	19215.7	1	1449585
3	1469601	1468931	19265.9	1	1468764
4	1489011	1488360	19314.8	1	1488197
5	1508154	1507771	19343.5	1	1507675
6	1526677	1527027	19317.3	1	1527114
7				1	1546344
8				2	1565661
9				3	1584979
10				4	1604296
11				5	1623613
12				6	1642931
13				7	1662248
14				8	1681565
15				9	1700882
16				10	1720200
17				11	1739517
18				12	1758834
19				13	1778152
20				14	1797469
21				15	1816786

Peramalan Jumlah Penduduk

Setelah dilakukan peramalan untuk jumlah pertumbuhan penduduk hingga tahun 2034, dapat dijadikan sebagai data untuk meramalkan pergerakkan pesawat seperti dengan bantuan microsoft excel. Hasil peramalan jumlah pergerakan pesawat di Bandar Udara Sultan Hasanuddin di Kota Makassar hingga tahun 2034 dapat dilihat pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Peramalan Jumlah Penduduk dan Pergerakan Pesawat

Tahun	Jumlah Penduduk	Jumlah Pergerakkan Pesawat
2014	1430637	34019
2015	1449585	37979
2016	1468764	41988
2017	1488197	46049
2018	1507675	50120
2019	1527114	54183
2020	1546344	58202
2021	1565661	62239
2022	1584979	66277
2023	1604296	70314
2024	1623613	74351
2025	1642931	78389
2026	1662248	82426
2027	1681565	86463
2028	1700882	90501
2029	1720200	94538
2030	1739517	98575
2031	1758834	102612
2032	1778152	106650
2033	1797469	110687
2034	1816786	114724

4.3 Permodelan Emisi Karbon Total Bandara

Dalam hal ini yang dimaksud adalah permodelan emisi karbon total Bandar Udara Sultan Hasanuddin akibat pertumbuhan penerbangan selama 15 tahun periode rencana. Permodelan ini telah diramalkan menggunakan metode ekonometri pada subbab 4.2.

Berikut adalah Langkah-langkah guna menghitung emisi karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin akibat pergerakkan pesawat.

CO = Emisi CO rerata x Pergerakkan Pesawat tahun ke – n
HC = Emisi HC rerata x Pergerakkan Pesawat tahun ke – n
CO_2 = Emisi CO_2 rerata x Pergerakkan Pesawat tahun ke – n

Dalam menganalisis emisi gas buang pada pesawat terbang terdapat berbagai macam jenis emisi, maka guna mempermudah proses analisis diperlukan nilai rerata dari masing-masing gas emisi untuk dikalikan dengan pergerakan pesawat setiap tahun. Pada Tabel 4.22 dapat dilihat beban emisi karbon rerata seluruh pesawat.

Tabel 4. 22 Beban Emisi Rerata Seluruh Pesawat Per Unit

Tipe Pesawat	Beban Emisi Per Unit (Lbs)		
	CO_2	CO	HC
A-320	1072.51	0.00029	0.0000023
ATR-72	404.52	0.00080	0.0000009
B-733	140.30	0.00008	0.0000004
B-738	200.75	0.00005	0.0000004
B-739	112.21	0.00003	0.0000002
CRJX	137.73	0.00009	0.0000007
MD-82	2159.53	0.00047	0.0000111
MD-83	2012.11	0.00044	0.0000103
Rerata	779.96	0.0003	0.000003

Nilai yang digunakan dalam permodelan

Dari Tabel 4.22 diatas, maka dapat diperoleh emisi karbon setiap tahun dan emisi karbon total hingga tahun 2034 dengan mengalikan nilai bebas emisi masing-masing dengan jumlah volume penerbangan seperti terlihat pada Tabel 4.23. Berikut ini adalah contoh perhitungan beban emisi CO, HC, dan CO_2 pada tahum 2020.

Data yang dibutuhkan dalam permalan bebas emisi di tahun 2020. Beban emisi CO rerata per unit = 0.0003 Lbs, beban emisi HC rerata per unit = 0.000003 Lbs, beban emisi CO_2 rerata per unit = 775.58 Lbs, dan volume pesawat di tahun 2020 = 58202

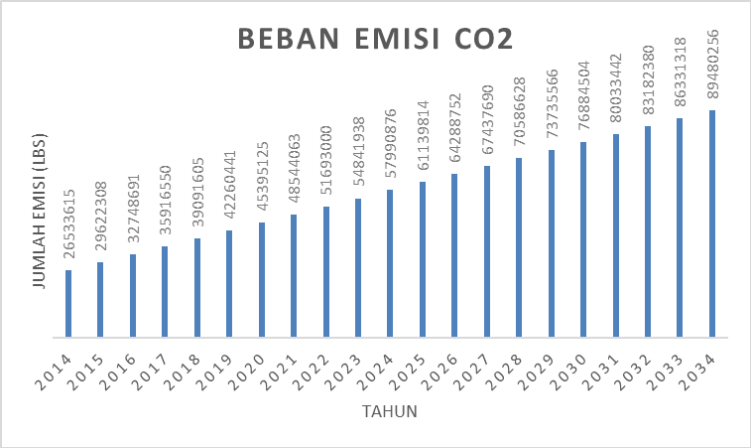
penerbangan sehingga dapat diperoleh hasil perhitungan seperti dibawah ini.

Beban emisi CO tahun 2020 = 0.0003 x 58202 = 16.49 Lbs
Beban emisi HC tahun 2020 = 0.000003 x 58202 = 0.19 Lbs
Beban emisi CO_2 tahun 2020 = 779.96 x 58202 = 45395134 Lbs

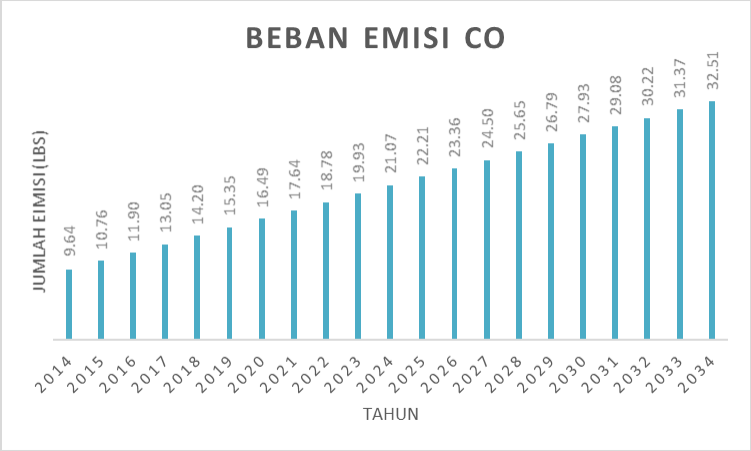
Tabel 4. 23 Beban Emisi Rerata Seluruh Pesawat Per Unit

Tahun	**Jumlah Volume Penerbangan**	**CO (Lbs)**	**HC (Lbs)**	**CO_2 (Lbs)**
		0.0003	**0.000003**	**779.96**
2014	34019	9.64	0.11	26533615
2015	37979	10.76	0.12	29622308
2016	41988	11.90	0.14	32748691
2017	46049	13.05	0.15	35916550
2018	50120	14.20	0.16	39091605
2019	54183	15.35	0.18	42260441
2020	58202	16.49	0.19	45395125
2021	62239	17.64	0.20	48544063
2022	66277	18.78	0.22	51693000
2023	70314	19.93	0.23	54841938
2024	74351	21.07	0.24	57990876
2025	78389	22.21	0.26	61139814
2026	82426	23.36	0.27	64288752
2027	86463	24.50	0.28	67437690
2028	90501	25.65	0.30	70586628
2029	94538	26.79	0.31	73735566
2030	98575	27.93	0.32	76884504
2031	102612	29.08	0.34	80033442
2032	106650	30.22	0.35	83182380
2033	110687	31.37	0.36	86331318
2034	114724	32.51	0.38	89480256

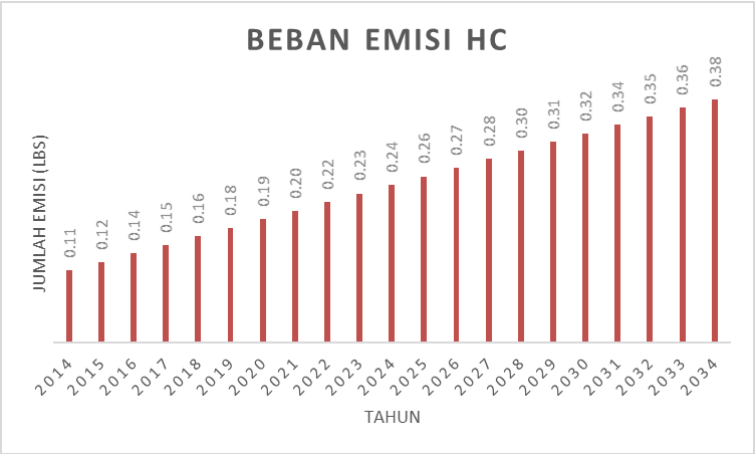
Guna mempermudah membaca besaran emisi karbon CO_2, CO , dan HC yang terjadi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin, maka dapat dilihat pada Gambar 4.15 sampai dengan 4.17.



Gambar 4. 16 Grafik Beban Emisi CO_2 Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin



Gambar 4. 17 Grafik Emisi CO Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin



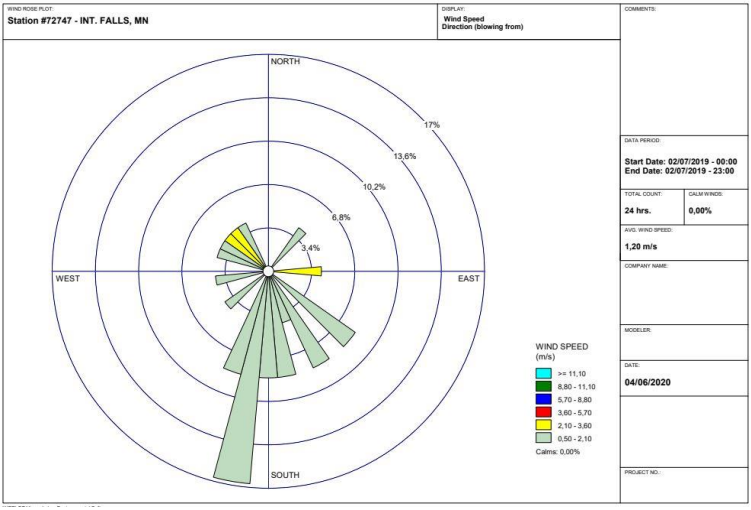
Gambar 4. 18 Grafik Beban Emisi HC Per Tahun Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin

Berdasarkan hasil analisis beban emisi setiap tahun seperti pada Gambar 4.16 sampai dengan 4.18, diketahui terdapat perbedaan yang signifikan antara CO_2, CO, dan HC, hal ini disebabkan karena CO_2 merupakan senyawa yang paling banyak dihasilkan pada proses pembakaran pesawat terbang saat *take off*.

4.4 Perhitungan Jarak Persebaran dan Arah Emisi

Guna mempermudah dalam melakukan perhitungan arah dan kecepatan angin, maka digunakan aplikasi WRPLOT *View*. Dengan menggunakan WRPLOT *View*, maka arah angin dominan beserta kecepatan angin rata-rata di Bandar Udara Sultan Hasanuddin dapat diketahui. Berikut ini merupakan hasil analisis WRPLOT *View* pada tanggal 2 Juli 2019 dapat dilihat pada Gambar 4.19. Pada tanggal 2 Juli 2019, arah angin dominan bertiup dari arah selatan dan kecepatan angin rata-rata adalah 1.20 m/s. Dengan arah angin dominan dari selatan, maka pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin menggunakan *runway* utama seperti pada Gambar 3.1 sehingga dapat dilihat bahwa pada titik referensi 1 dan 2 mayoritas persebaran beban

emisi karbon yang terjadi pada saat LTO di bandar udara tersebut ke arah selatan dan utara.



Gambar 4. 19 *Wind Rose* Pada Tanggal 2 Juli 2019

Guna melihat hasil analisis *wind rose* di Bandar Udara Sultan Hasanuddin pada tanggal 3 Juli 2019 sampai dengan 8 Juli 2019 dapa dilihat pada Lampiran 12 sampai dengan 17.

Setelah mengetahui arah persebarannya, langkah selanjutnya adalah menghitung jarak persebaran emisi karbon tersebut dengan menggunakan rumus 3-1. Contoh perhitungan jarak persebarannya seperti dibawah ini.

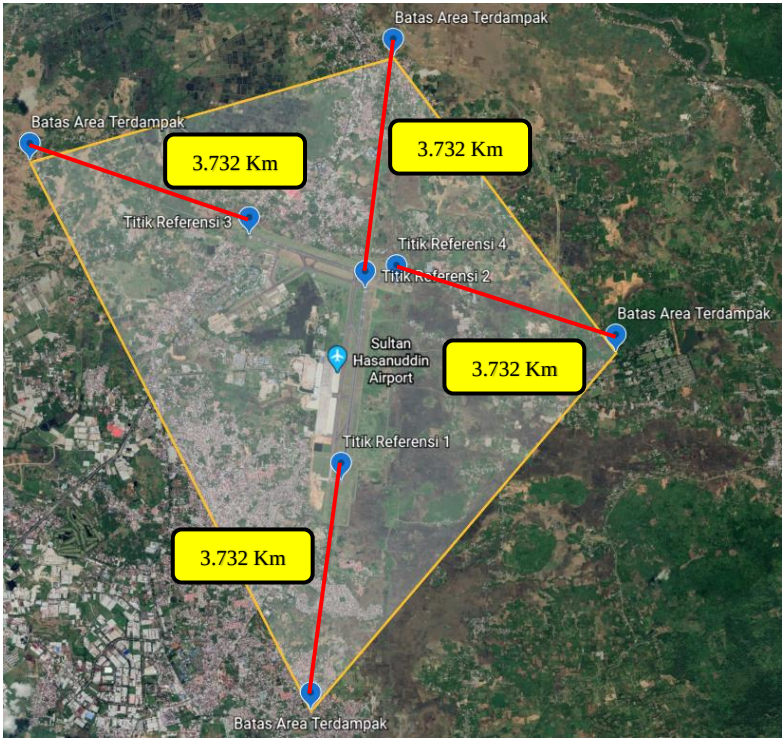
$$\text{Tan } \alpha = \frac{1000 \text{ meter}}{x}$$

$$\text{Tan } (15^0) = \frac{1000 \text{ meter}}{x}$$

$$x = \frac{1000 \text{ meter}}{0.2679}$$

$$x = 3732 \text{ meter}$$

Nilai 15^0 didapatkan dari sudut ketika pesawat melakukan *take off* menuju *climb* atau biasa disebut dengan fase LTO yang terlihat pada Gambar 2.3. Dari hasil perhitungan diatas, maka dapat diketahui jarak persebaran emisi dari setiap titik referensi sejauh 3.732 meter. Guna melihat batas area yang terdampak emisi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin terlihat seperti Gambar 4.20.



Gambar 4. 20 Batas Area Yang Terdampak Emisi Di Bandar Udara Sultan Hasanuddin

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan dalam tugas akhir ini, antara lain:

1. Pergerakan pesawat total di Bandar Udara Sultan Hasanuddin berdasarkan peramalan atau *forecasting* dengan menggunakan metode *exponential smooting* dan regresi linear ekonometri, maka dapat diketahui bahwa pergerakan pesawat setiap tahunnya mengalami peningkatan hingga tahun 2034 pada periode rencana dari 34.019 hingga 114.724.
2. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* SPSS versi 26 dapat diketahui bahwa jumlah pertumbuhan penduduk dan pendapatan per kapita berpengaruh terhadap pergerakan pesawat dengan tingkat pengaruh sebesar 98.7% dan nilai signifikansi sebesar 0.026 (Sig < 0.1 = Signifikan).
3. Berdasarkan hasil analisis beban emisi tertinggi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin adalah karbon dioksida sebesar 89.480.256 Lbs yang merupakan salah satu gas rumah kaca serta dapat memicu pemanasan global. Selain itu, diketahui beban emisi hidrokarbon sebesar 0.38 Lbs dan karbon monoksida sebesar 32.51 Lbs. Beban emisi diatas dapat membuat kualitas hidup manusia yang berada disekitar bandar udara tersebut mengalami penurunan karena dapat menimbulkan gangguan kesehatan.
4. Berdasarkan hasil analisis jarak persebaran emisi karbon di Bandar Udara Sultan Hasanuddin sejauh 3.732 km dari setiap titik referensi yang ditinjau yaitu di ujung *runway* dan arah persebaran dominannya adalah ke selatan dan utara.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis data dan perhitungan yang telah dilakukan, ada beberapa saran guna memberikan evaluasi dalam pengerjaan tugas akhir ini agar dapat dikembangkan lebih lanjut, antara lain:

1. Perhitungan beban emisi karbon di Bandar Udara Sultan Hasanuddin ini dapat digunakan sebagai langkah awal dalam menentukan kebijakan dan pengembangan bandar udara yang memperhatikan faktor lingkungan.
2. Memperbanyak lahan terbuka hijau di area sekitar bandar udara agar beban emisi yang dikeluarkan pesawat saat LTO tidak langsung tersebar ke atmosfer bumi.
3. Menggunakan pesawat dengan teknologi mesin yang memiliki nilai *bypass ratio* tinggi agar beban emisi yang dikeluarkan oleh pesawat saat fase LTO menjadi lebih sedikit.
4. Menentukan jarak bagi pemukiman dan fasilitas umum disekitar bandar udara agar tidak terdampak beban emisi yang dihasilkan oleh pesawat.
5. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai emisi dalam pengukuran langsung dan korelasinya dengan teori yang sudah ada.
6. Perlu dilakukan analisis beban emisi karbon bagi pesawat yang beroperasi di Bandar Udara Sultan Hasanuddin, bukan hanya pesawat penumpang melainkan pesawat cargo atau barang.

DAFTAR PUSTAKA

Ashford, N. J, Mumayiz, S.A, Wright, P.H. 2011. *Airport Engineering*. Canada: Wiley.

Ahyudanari, E. 2019. Airport location of city center and its contribution to air quality, Geographia Technica.

Dewansyah I. 2015. Mawar angin, Universitas Lampung, Bandar Lampung.

Gujarati, D.N. 2003. *Basic Ekonometrics*. New York: Mc Graw Hill.

Horonjeff. 2010. *Planning and Design of Airport 5th edition*. 5th edn. New York: Mc Graw Hill.

Indriatmoko, R.H, Purwanta, W. 2017. Perubahan lingkungan dan strategi adaptasi dampak perubahan iklim di bandar udara Hasanuddin, Makassar, Jurnal Teknologi Lingkungan.

Intergovermental Panel on Climate Change [IPCC]. 1999. *The Growing Contribution of Aviation to Global Warming.*

Intergovermental Panel on Climate Change [IPCC]. 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Enventories*.

Intergovermental Panel on Climate Change [IPCC]. 2010. *The Role of The IPCC and Key Elements of The IPCC Assessment Process.*

Jayanti, N.E, Hakam, M, Santiasih, I. 2014. Emisi gas *carbon monooksida* (CO) dan *hidrocarbon* (HC) pada rekayasa jumlah *blade turbo ventilator* sepeda motor “supra x 125 tahun 2006”, Rotasi.

Jimenez, C. 2013. Comparison of three angel of attack (AOA) indicators: a usability study, Aeronautical University, Florida.

Kaleka, Y.U, Suyasa, W.B, Mahendra, M.S. 2015. Beban emisi aktivitas LTO pesawat udara di bandar udara internasional I Gusti Ngurah Rai Bali, Ecotrophic, Universitas Udayana, Bali.

Norman, J, Ashford, Mumayiz, S.A, Wright, P.H. 2011. *Airport Engineering: planning, Design, and Development of 21st Century Airports*. Canada: John Wiley & Sons.

Penner, J.E, Lister, D.H, Griggs, D.J, Dokken, D.J, Macfarland, M. 1999. *Aviation and The Global Atmosphere*. United Kingdom: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Purwanta, W. 2015. Profil emisi gas buangan dari pesawat udara di sejumlah bandara di Indonesia, Jurnal Teknologi Lingkungan.

Rypdal, K. 2000. *Aircraft Emissions in Background Paper IPCC Expert meeting on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventory*.

Sihotang, S.R, Assomadi, A.F. 2010. Pemetaan distribusi konsentrasi karbon dioksida (CO_2) dari kontribusi kendaraan bermotor di kampus ITS Surabaya, Jurnal Ilmiah Surabaya.

Slamet, L.S. 2007. Potensi dan dampak polusi udara dari sektor penerbangan.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Kedatangan Pesawat Per Tahun 2014 - 2019

Tipe Pesawat	Kedatangan Pesawat Per Tahun					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
A109S	0	1	0	0	0	0
A300-600R	0	0	2	1	0	0
A320	1792	2884	6020	11689	13372	5488
A330	47	0	0	0	0	0
A330-200	0	0	3	0	0	0
A330-300	0	3	4	0	0	0
A332	268	131	38	124	160	7
A333	32	261	215	169	89	42
ACAR	0	0	2	0	0	0
AN12	1	1	0	0	0	0
AS35	0	0	0	0	20	0
AS350	0	2	0	0	0	0
AS36	0	0	0	0	3	0
AS65	0	0	0	0	1	0
AT42	0	0	53	0	0	0
AT45	57	109	0	0	1	0
AT46	3	0	0	0	0	0
AT72	513	5.381	3.004	0	0	0
AT8T	0	1	0	0	0	0
ATR42	261	236	198	308	322	158
ATR42-500	0	1	0	0	0	0
ATR45	0	0	0	0	0	1
ATR72	5429	0	2258	6677	7935	3648

Lampiran 1. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Kedatangan Pesawat Per Tahun					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ATR72-600	0	11	29	14	2	0
ATR76	0	0	0	1	0	0
AW139	0	0	0	0	6	0
B047	0	0	0	0	1	0
B105	6	4	1	2	0	1
B190	2	2	2	5	2	7
B1900D	2	3	0	1	0	0
B200	6	0	0	0	0	0
B200C	1	0	0	0	0	0
B208	1	0	0	0	0	0
B350	2	1	4	6	42	9
B400	1	0	0	0	0	0
B407	2	3	0	3	21	6
B412	0	0	0	0	1	0
B429	0	0	1	14	58	16
B430	0	0	0	0	0	2
B461	0	0	2	1	0	0
B462	0	1	4	1	0	0
B732	183	4	3	3	0	0
B732-200	0	1	5	0	0	2
B733	2210	2211	3521	3088	1880	790
B734	693	618	197	234	2	0
B735	3569	3268	2505	1480	1871	611
B737	0	0	1	6	15	9

Lampiran 1. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Kedatangan Pesawat Per Tahun					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
B737-200	0	0	0	2	1	2
B737-300	0	0	2	3	1	0
B737-800	0	11	3	0	0	0
B738	11039	14065	14330	15214	16526	6540
B738MAX	0	0	0	468	1109	196
B739	9780	2990	187	545	1120	187
B739ER	0	6074	11225	10708	9588	3766
B744	45	11	23	29	1	0
B747	2	0	1	0	0	0
B900XP	0	7	0	0	0	0
BAE146	13	0	0	2	0	0
BE140	0	2	0	0	0	0
BE20	14	3	10	14	13	4
BE36	0	0	3	1	0	1
BE40	7	4	5	21	13	1
BE400	0	3	2	5	1	4
BELL407	2	0	0	0	0	0
BELL412	0	0	0	0	0	1
BELL429	0	0	0	1	0	0
BJ400A	0	2	4	0	6	1
BJET400	0	2	0	0	0	0
BK117	0	0	2	0	0	0
C130	0	0	0	0	1	0
C206	12	0	2	0	1	0

Lampiran 1. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Kedatangan Pesawat Per Tahun					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
C206H	0	3	0	0	0	0
C208	33	6	268	28	36	15
C208B	3	1	1	3	0	0
C208G	0	0	0	0	1	0
C212	1	4	7	2	0	1
C510	0	0	0	0	0	1
C550	0	0	0	0	1	0
C560	0	2	2	0	0	0
C650	1	0	0	0	0	0
C680	0	1	0	0	3	0
CATS48	1	0	0	0	0	0
CESSNA	0	0	0	1	5	0
CL35	0	0	0	0	1	0
CL60	3	2	3	2	1	3
CL601	2	0	0	0	0	0
CL605	0	2	0	0	1	0
CL850	0	0	0	3	0	0
CRJ7	0	0	0	1	0	0
CRJX	3542	3920	4310	4134	3298	866
CS12	0	0	0	0	1	0
D228	1	1	0	0	0	0
D328	0	3	6	3	0	0
DA20	2	0	0	0	0	0
DC9	0	0	2	0	0	0

Lampiran 1. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Kedatangan Pesawat Per Tahun					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
DH8B	1	1	3	1	0	0
DH8C	0	0	0	0	1	0
DHC6	482	418	69	4	19	0
DHC7	3	0	0	0	0	0
DSC8	0	0	1	0	0	0
E120	22	0	0	0	0	0
E135	72	35	12	6	5	6
E145	0	0	9	13	1	2
E190	0	3	323	28	2	5
E195	0	10	1	0	0	0
E35L	5	0	0	0	0	0
E50P	0	14	9	0	0	0
E55P	2	2	2	0	1	0
EC135	0	2	0	0	0	0
EC155	0	0	0	0	10	0
EC55	0	1	0	0	0	0
EM35	6	1	0	0	0	0
EMB145	1	0	0	0	0	0
F100	2	8	9	10	12	0
F27	1	1	0	1	0	1
F50	50	1	35	342	1	0
F900	4	0	0	2	3	1
FALC900	0	5	0	0	0	0
G150	0	0	0	0	2	0

Lampiran 1. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Kedatangan Pesawat Per Tahun					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
G200	0	0	0	0	0	1
G550	0	2	1	1	0	0
G650	0	0	0	0	1	0
GLEX	4	0	0	1	3	0
GLF4	2	0	0	0	2	2
GLF5	1	1	5	19	12	2
H25B	9	11	5	10	6	0
H800XP	0	4	0	0	0	0
H900XP	0	0	0	0	4	0
HA5179	0	1	0	0	0	0
HS125	0	0	13	0	0	0
HS25	2	0	0	0	0	0
HS748	0	0	0	0	0	1
IDAF02	0	0	0	0	1	0
KOD100	0	0	0	0	1	0
L410	0	0	0	0	3	0
L600	0	0	0	2	18	10
LJ31	0	1	0	0	0	0
LJ35	1	0	0	0	0	0
LJ45	2	1	0	0	0	0
LJ60	6	0	0	0	0	0
MA60	55	0	0	0	0	0
MD11	0	0	1	0	0	0
MD82	566	687	635	600	591	324

Lampiran 1. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Kedatangan Pesawat Per Tahun					
	2014	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
MD83	347	293	157	246	291	135
N127BG	4	0	0	0	0	0
N330AG	2	0	0	0	0	0
N77HS	1	0	0	0	0	0
N977HS	1	0	0	0	0	0
P180	9	3	3	2	1	1
P3103	0	1	0	0	0	0
P750	8	0	0	0	0	0
PC12	0	0	0	1	1	0
PHNM300	0	18	0	0	0	0
PRM1	1	1	4	0	0	0
PUMA	0	0	0	4	0	0
R66	0	0	0	0	25	0
RJ85	2	2	2	3	1	1
S360	1	0	0	0	0	0
S76	1	0	0	0	2	1
S76C	0	0	0	0	5	0
S92	0	1	0	0	0	0
SD360	1	0	1	0	0	0
TBJ58	2	0	0	0	0	0
WW24	0	1	0	0	2	0

(Sumber: PT. Angkasa Pura I)

Lampiran 2. Jarak dan Destinasi Penerbangan Pesawat Analisis

Tipe Pesawat	**Destinasi Penerbangan**	**Jarak (Nm)**
A320	Hauloleo Airport	181
A320	Hauloleo Airport	181
A320	Mutiara Airport	248
A320	Mutiara Airport	248
A320	Temindung Airport	309
A320	Syukuran Aminuddin Amir Airport	309
A320	Ngurah Rai International Airport	342
A320	Juanda International Airport	428
A320	Juanda International Airport	428
A320	Juanda International Airport	428
A320	Juanda International Airport	428
A320	Sam Ratulangi International Airport	510
A320	Pattimura Airport	518
A320	Adisucipto International Airport	569
A320	Sultan Babullah Airport	587
A320	Domine Edward Osok Airport	747
A320	Domine Edward Osok Airport	747
A320	Halim Perdana Kusuma Airport	761
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774

Lampiran 2. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Destinasi Penerbangan	Jarak (Nm)
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Soekarno - Hatta International Airport	774
A320	Rendani Airport	905
A320	Kuala Lumpur International Airport	1169
A320	Mopah Airport	1262
A320	Sentani Airport	1266
A320	Sentani Airport	1266
ATR72	Sangia Nibandera Airport	134
ATR72	Sangia Nibandera Airport	134
ATR72	Sangia Nibandera Airport	134
ATR72	Tampa Padang Airport	148
ATR72	Tampa Padang Airport	148
ATR72	Haji Aroeppala Airport	173
ATR72	Haji Aroeppala Airport	173
ATR72	Bua Airport	177
ATR72	Hauloleo Airport	181
ATR72	Betoambari Airport	182
ATR72	Betoambari Airport	182
ATR72	Betoambari Airport	182
ATR72	Sugimanuru Airport)	190
ATR72	Komodo Airport	206
ATR72	Sultan Muhammad Salahuddin Airport	214
ATR72	Gusti Syamsir Alam Airport	229
ATR72	Bersujud Airport	235
ATR72	Mutiara Airport	248

Lampiran 2. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Destinasi Penerbangan	Jarak (Nm)
ATR72	Wai Oti Airport	267
ATR72	Sultan Aji Muhamad Sulaiman Airport	277
ATR72	Ngurah Rai International Airport	343
ATR72	Maleo Airport	381
ATR72	Maleo Airport	381
ATR72	Pattimura Airport	518
B733	Syamsudin Noor Airport	303
B733	Juanda International Airport	428
B733	Soekarno - Hatta International Airport	774
B733	Soekarno - Hatta International Airport	774
B733	Rendani Airport	905
B735	Sultan Aji Muhamad Sulaiman Airport	277
B735	Syukuran Aminuddin Amir Airport	309
B735	Syukuran Aminuddin Amir Airport	309
B735	Juanda International Airport	428
B735	Domine Edward Osok Airport	747
B735	Kuabang Airport	761
B738	Hauloleo Airport	181
B738	Hauloleo Airport	181
B738	Hauloleo Airport	181
B738	Hauloleo Airport	181
B738	Mutiara Airport	248
B738	Lombok Praya International Airport	295
B738	Ngurah Rai International Airport	342
B738	Ngurah Rai International Airport	342
B738	Djalaluddin Airport	394

Lampiran 2. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Destinasi Penerbangan	Jarak (Nm)
B738	Djalaluddin Airport	394
B738	Juanda International Airport	428
B738	Juwata International Airport	515
B738	Pattimura Airport	518
B738	Pattimura Airport	518
B738	Achmad Yani International Airport	561
B738	Adisucipto International Airport	569
B738	Adisucipto International Airport	569
B738	Sultan Babullah Airport	587
B738	Supadio Airport	676
B738	Kertajati International Airport	749
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774

Lampiran 2. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Destinasi Penerbangan	Jarak (Nm)
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Soekarno - Hatta International Airport	774
B738	Frans Kaisiepo Airport	1020
B738	Frans Kaisiepo Airport	1020
B738	Mozes Kilangin Airport	1039
B738	Mozes Kilangin Airport	1039
B738	Sentani Airport	1266
B738	Sentani Airport	1266
B739	Mutiara Airport	248
B739	Mutiara Airport	248
B739	Sultan Aji Muhamad Sulaiman Airport	277
B739	Sultan Aji Muhamad Sulaiman Airport	277
B739	Sultan Aji Muhamad Sulaiman Airport	277
B739	Syamsudin Noor Airport)	303
B739	Ngurah Rai International Airport	342
B739	Ngurah Rai International Airport	342
B739	Djalaluddin Airport	394
B739	Juanda Internatiional Airport	428
B739	Juanda International Airport	428
B739	Juanda International Airport	428
B739	Sam Ratulangi International Airport	510
B739	Sam Ratulangi International Airport	510
B739	Pattimura Airport	518
B739	Pattimura Airport	518
B739	Adisucipto International Airport	569

Lampiran 2. (Lanjutan)

Tipe Pesawat	Destinasi Penerbangan	Jarak (Nm)
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
CRJX	Tampa Padang Airport	148
CRJX	Juanda International Airport	428
CRJX	Achmad Yani International Airport	561
CRJX	Domine Edward Osok Airport	747
MD82	Juanda International Airport	427
MD82	Mozes Kilangin Airport	1038
MD83	Soekarno - Hatta International Airport	774
MD83	Mozes Kilangin Airport	1039
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
B739	Soekarno - Hatta International Airport	774
CRJX	Tampa Padang Airport	148
CRJX	Juanda International Airport	428
CRJX	Achmad Yani International Airport	561
CRJX	Domine Edward Osok Airport	747
MD82	Juanda International Airport	427
MD82	Mozes Kilangin Airport	1038
MD83	Soekarno - Hatta International Airport	774
MD83	Mozes Kilangin Airport	1039

(Sumber: PT. Angkasa Pura I)

Lampiran 3. Perhitungan ZFW Tipe Pesawat ATR72

Perhitungan Y ketika ZFW 15000				ATR72
X1	500	Y1	8073	
X	518	Y	8174.994	
X2	1000	Y2	10904	
Perhitungan Y Ketika ZFW 20000				
X1	500	Y1	8368	
X	518	Y	8472.622	
X2	1000	Y2	11272	
Perhitungan Y Ketika ZFW 15404				
X1	15000	Y1	8174.994	
X	15404	Y	8496.671	
X2	20000	Y2	8473	

Lampiran 4. Perhitungan ZFW Tipe Pesawat B733

Perhitungan Y ketika ZFW 105000				B733
X1	500	Y1	14200	
X	906	Y	14524.8	
X2	1000	Y2	14600	
Perhitungan Y Ketika ZFW 110000				
X1	500	Y1	14600	
X	906	Y	18822.4	
X2	1000	Y2	19800	
Perhitungan Y Ketika ZFW 105840				
X1	105000	Y1	14524.8	
X	105840	Y	19544.4	
X2	110000	Y2	18822	

Lampiran 5. Perhitungan ZFW Tipe Pesawat B738

Perhitungan Y ketika ZFW 136000				B738
X1	1000	Y1	22800	
X	1266	Y	26151.6	
X2	1500	Y2	29100	
Perhitungan Y Ketika ZFW 142000				
X1	1000	Y1	23350	
X	1266	Y	27033.97	
X2	1500	Y2	30275	
Perhitungan Y Ketika ZFW 138300				
X1	136000	Y1	26151.6	
X	138300	Y	27372.22	
X2	142000	Y2	27034	

Lampiran 6. Perhitungan ZFW Tipe Pesawat B739

Perhitungan Y ketika ZFW 148000				B739
X1	500	Y1	17623	
X	775	Y	21183.53	
X2	1000	Y2	24097	
Perhitungan Y Ketika ZFW 154000				
X1	500	Y1	18137	
X	775	Y	21834.02	
X2	1000	Y2	24859	
Perhitungan Y Ketika ZFW 149300				
X1	148000	Y1	21183.53	
X	149300	Y	21974.96	
X2	154000	Y2	21834	

Lampiran 7. Perhitungan ZFW Tipe Pesawat MD82

Perhitungan Y ketika ZFW 40000				MD82
X1	1000	Y1	12844	
X	1038	Y	13136.52	
X2	1500	Y2	16699	
Perhitungan Y Ketika ZFW 45000				
X1	1000	Y1	13262	
X	1038	Y	13558.58	
X2	1500	Y2	17171	
Perhitungan Y Ketika ZFW 42895				
X1	40000	Y1	13136.52	
X	42895	Y	13802.96	
X2	45000	Y2	13559	

Lampiran 8. Perhitungan ZFW Tipe Pesawat MD83

Perhitungan Y ketika ZFW 40000				MD83
X1	1000	Y1	12844	
X	1039	Y	13144.23	
X2	1500	Y2	16699	
Perhitungan Y Ketika ZFW 45000				
X1	1000	Y1	13262	
X	1039	Y	13566.4	
X2	1500	Y2	17171	
Perhitungan Y Ketika ZFW 42127				
X1	40000	Y1	13144.23	
X	42127	Y	13745.99	
X2	45000	Y2	13566	

Lampiran 9. Perhitungan ZFW Tipe Pesawat CRJX

Perhitungan Y ketika ZFW 25000				CRJX
X1	500	Y1	8668	
X	747	Y	10140.91	
X2	1000	Y2	11650	
Perhitungan Y Ketika ZFW 30000				
X1	500	Y1	8973	
X	747	Y	10486.91	
X2	1000	Y2	12038	
Perhitungan Y Ketika ZFW 27339				
X1	25000	Y1	10140.91	
X	27339	Y	10648.77	
X2	30000	Y2	10487	

Lampiran 10. Jumlah Pertumbuhan Penduduk Di Sulawesi Selatan

Kabupaten / Kota	**Jumlah Penduduk Jiwa**						
	2014	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**
Kepulauan Selayar	128744	130199	131605	133003	134280	135624	136871
Bulukumba	407775	410485	413229	415713	418326	420603	423012
Bantaeng	182283	183386	184517	185581	186612	187626	188495
Jeneponto	353287	355599	357807	359787	361793	363792	365610
Takalar	283762	286906	289978	292983	295892	298688	301424
Gowa	709386	722702	735493	748200	760607	772684	784511
Sinjai	236497	238099	239689	241208	242672	244125	245389
Maros	335596	339300	342890	346383	349822	353121	356195
Pangkep	320293	323597	326700	329791	332674	335514	338219
Barru	170316	171217	171906	172767	173623	174323	174989
Bone	738515	742912	746973	751026	754894	758589	762073
Soppeng	225709	226116	226305	226466	226770	226991	227208
Wajo	391980	393218	394495	395583	396810	397814	398784
Sidrap	286610	289787	292985	296125	299123	301972	304826
Pinrang	364087	366789	369595	372230	374583	377119	379402

Lampiran 10. (Lanjutan)

Kabupaten / Kota	Jumlah Penduduk Jiwa						
	2014	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**
Enrekang	198194	199998	201614	203320	204827	206387	207800
Luwu	347096	350218	353277	356305	359209	362027	364680
Tana Toraja	227588	228984	230195	231519	232821	234002	235103
Luwu Utara	299989	302687	305372	308001	310470	312883	315202
Luwu Timur	269405	275595	281822	287874	293822	299673	305407
Toraja Utara	224003	225516	226988	228414	229798	231214	232394
Makassar	1429242	1449401	1469601	1489011	1508154	1526677	1545373
Pare Pare	136903	138699	140423	142097	143710	145178	146714
Palopo	164903	168894	172916	176907	180678	184614	188323
Sulawesi Selatan	8432163	8520304	8606375	8690294	8771970	8851240	8928004

(Sumber:Badan Pusat Statistika Kota Makassar

Lampiran 11. Data Arah dan Kecepatan Angin

Tahun	Bulan	Tanggal	Jam	Arah	Kecepatan
2019	7	2	1	190°	1 m/s
2019	7	2	2	150°	1 m/s
2019	7	2	3	150°	1 m/s
2019	7	2	4	160°	1.5 m/s
2019	7	2	5	290°	1 m/s
2019	7	2	6	190°	1 m/s
2019	7	2	7	310°	2.6 m/s
2019	7	2	8	320°	2.1 m/s
2019	7	2	9	330°	1.5 m/s
2019	7	2	10	300°	1 m/s
2019	7	2	11	260°	1 m/s
2019	7	2	12	170°	1 m/s
2019	7	2	13	180°	0.5 m/s
2019	7	2	14	130°	1 m/s
2019	7	2	15	90°	2.1 m/s
2019	7	2	16	40°	1.5 m/s
2019	7	2	17	170°	1 m/s
2019	7	2	18	130°	1 m/s
2019	7	2	19	180°	1.5 m/s
2019	7	2	20	200°	1 m/s
2019	7	2	21	190°	1 m/s
2019	7	2	22	230°	1.5 m/s
2019	7	2	23	200°	0.5 m/s
2019	7	2	24	190°	0.5 m/s
2019	7	3	1	190°	0.5 m/s
2019	7	3	2	300°	2.6 m/s
2019	7	3	3	340°	2.6 m/s
2019	7	3	4	230°	3.1 m/s
2019	7	3	5	290°	3.1 m/s
2019	7	3	6	200°	2.1 m/s
2019	7	3	7	240°	4.1 m/s
2019	7	3	8	250°	2.1 m/s

Lampiran 11. (Lanjutan)

Tahun	Bulan	Tanggal	Jam	Arah	Kecepatan
2019	7	3	9	270°	1.5 m/s
2019	7	3	10	340°	1.5 m/s
2019	7	3	11	320°	2.1 m/s
2019	7	3	12	20°	2.1 m/s
2019	7	3	13	350°	2.1 m/s
2019	7	3	14	320°	1 m/s
2019	7	3	15	190°	1 m/s
2019	7	3	16	260°	1 m/s
2019	7	3	17	140°	0.5 m/s
2019	7	3	18	330°	0.5 m/s
2019	7	3	19	140°	1 m/s
2019	7	3	20	150°	1.5 m/s
2019	7	3	21	110°	1.5 m/s
2019	7	3	22	110°	1.5 m/s
2019	7	3	23	110°	1 m/s
2019	7	3	24	120°	1.5 m/s
2019	7	4	1	90°	1.5 m/s
2019	7	4	2	70°	1.5 m/s
2019	7	4	3	40°	1 m/s
2019	7	4	4	280°	1.5 m/s
2019	7	4	5	300°	4.6 m/s
2019	7	4	6	290°	5.1 m/s
2019	7	4	7	310°	4.6 m/s
2019	7	4	8	300°	4.6 m/s
2019	7	4	9	300°	2.6 m/s
2019	7	4	10	160°	2.1 m/s
2019	7	4	11	110°	2.6 m/s
2019	7	4	12	220°	1 m/s
2019	7	4	13	170°	1 m/s
2019	7	4	14	170°	1.5 m/s
2019	7	4	15	120°	1.5 m/s
2019	7	4	16	100°	2.1 m/s

Lampiran 11. (Lanjutan)

Tahun	Bulan	Tanggal	Jam	Arah	Kecepatan
2019	7	4	17	90°	1.5 m/s
2019	7	4	18	120°	1.5 m/s
2019	7	4	19	140°	1.5 m/s
2019	7	4	20	160°	1 m/s
2019	7	4	21	100°	1.5 m/s
2019	7	4	22	130°	1 m/s
2019	7	4	23	140°	1.5 m/s
2019	7	4	24	180°	0.5 m/s
2019	7	5	1	130°	1.5 m/s
2019	7	5	2	150°	1.5 m/s
2019	7	5	3	140°	2.6 m/s
2019	7	5	4	290°	3.1 m/s
2019	7	5	5	330°	2.1 m/s
2019	7	5	6	290°	4.1 m/s
2019	7	5	7	310°	2.6 m/s
2019	7	5	8	300°	2.6 m/s
2019	7	5	9	300°	4.1 m/s
2019	7	5	10	280°	3.6 m/s
2019	7	5	11	40°	3.1 m/s
2019	7	5	12	80°	1.5 m/s
2019	7	5	13	90°	2.1 m/s
2019	7	5	14	110°	2.6 m/s
2019	7	5	15	100°	2.6 m/s
2019	7	5	16	90°	2.1 m/s
2019	7	5	17	120°	2.6 m/s
2019	7	5	18	130°	2.6 m/s
2019	7	5	19	130°	2.6 m/s
2019	7	5	20	190°	0.5 m/s
2019	7	5	21	140°	2.1 m/s
2019	7	5	22	140°	2.6 m/s
2019	7	5	23	210°	1.5 m/s
2019	7	5	24	210°	1.5 m/s

Lampiran 11. (Lanjutan)

Tahun	Bulan	Tanggal	Jam	Arah	Kecepatan
2019	7	6	1	190°	1.5 m/s
2019	7	6	2	160°	2.1 m/s
2019	7	6	3	90°	1.5 m/s
2019	7	6	4	30°	4.6 m/s
2019	7	6	5	60°	4.6 m/s
2019	7	6	6	50°	3.1 m/s
2019	7	6	7	20°	4.1 m/s
2019	7	6	8	40°	4.1 m/s
2019	7	6	9	50°	2.6 m/s
2019	7	6	10	90°	2.1 m/s
2019	7	6	11	50°	1.5 m/s
2019	7	6	12	90°	1.5 m/s
2019	7	6	13	110°	2.1 m/s
2019	7	6	14	110°	1 m/s
2019	7	6	15	140°	2.1 m/s
2019	7	6	16	110°	1.5 m/s
2019	7	6	17	100°	3.1 m/s
2019	7	6	18	110°	2.1 m/s
2019	7	6	19	210°	0.5 m/s
2019	7	6	20	180°	0.5 m/s
2019	7	6	21	180°	0.5 m/s
2019	7	6	22	140°	1 m/s
2019	7	6	23	170°	1 m/s
2019	7	6	24	170°	0.5 m/s
2019	7	7	1	200°	1.5 m/s
2019	7	7	2	80°	1.5 m/s
2019	7	7	3	90°	2.6 m/s
2019	7	7	4	350°	2.6 m/s
2019	7	7	5	300°	2.6 m/s
2019	7	7	6	250°	2.6 m/s
2019	7	7	7	300°	4.6 m/s
2019	7	7	8	290°	4.6 m/s

Lampiran 11. (Lanjutan)

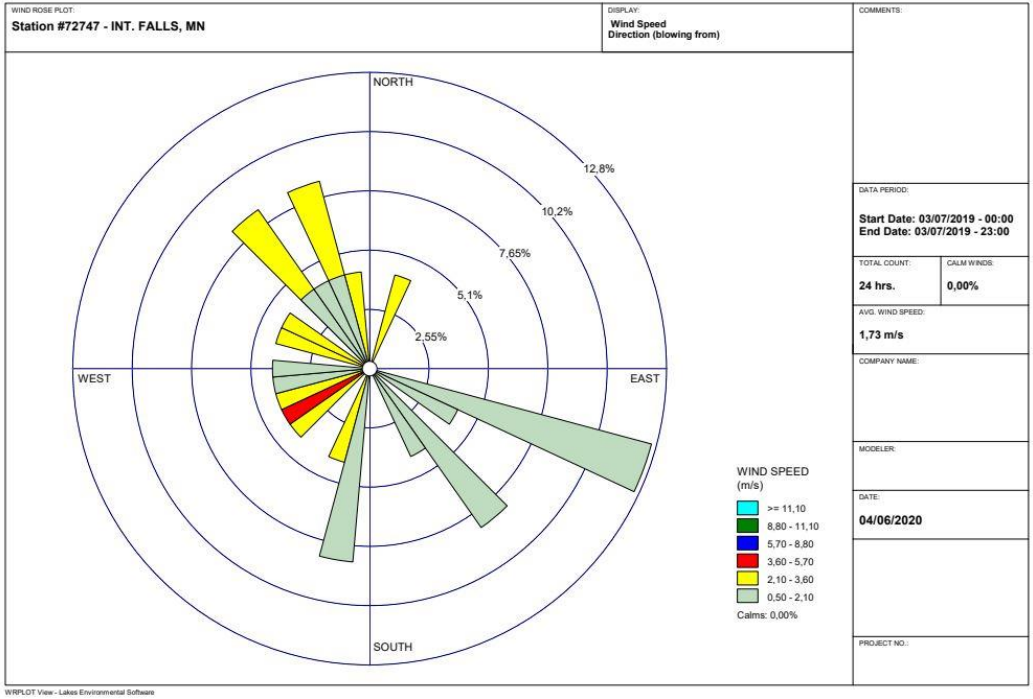
Tahun	Bulan	Tanggal	Jam	Arah	Kecepatan
2019	7	7	9	330°	2.1 m/s
2019	7	7	10	330°	2.1 m/s
2019	7	7	11	70°	2.6 m/s
2019	7	7	12	70°	2.1 m/s
2019	7	7	13	140°	2.1 m/s
2019	7	7	14	110°	2.1 m/s
2019	7	7	15	110°	1.5 m/s
2019	7	7	16	130°	1 m/s
2019	7	7	17	90°	1 m/s
2019	7	7	18	230°	1.5 m/s
2019	7	7	19	230°	1.5 m/s
2019	7	7	20	180°	0.5 m/s
2019	7	7	21	180°	0.5 m/s
2019	7	7	22	60°	0.5 m/s
2019	7	7	23	110°	0.5 m/s
2019	7	7	24	190°	1 m/s
2019	7	8	1	200°	1.5 m/s
2019	7	8	2	180°	1.5 m/s
2019	7	8	3	170°	1.5 m/s
2019	7	8	4	300°	3.1 m/s
2019	7	8	5	290°	4.6 m/s
2019	7	8	6	250°	4.6 m/s
2019	7	8	7	310°	5.1 m/s
2019	7	8	8	310°	3.6 m/s
2019	7	8	9	350°	2.6 m/s
2019	7	8	10	340°	2.6 m/s
2019	7	8	11	360°	1 m/s
2019	7	8	12	110°	2.1 m/s
2019	7	8	13	100°	2.1 m/s
2019	7	8	14	190°	1 m/s
2019	7	8	15	320°	0.5 m/s
2019	7	8	16	190°	0.5 m/s

Lampiran 11. (Lanjutan)

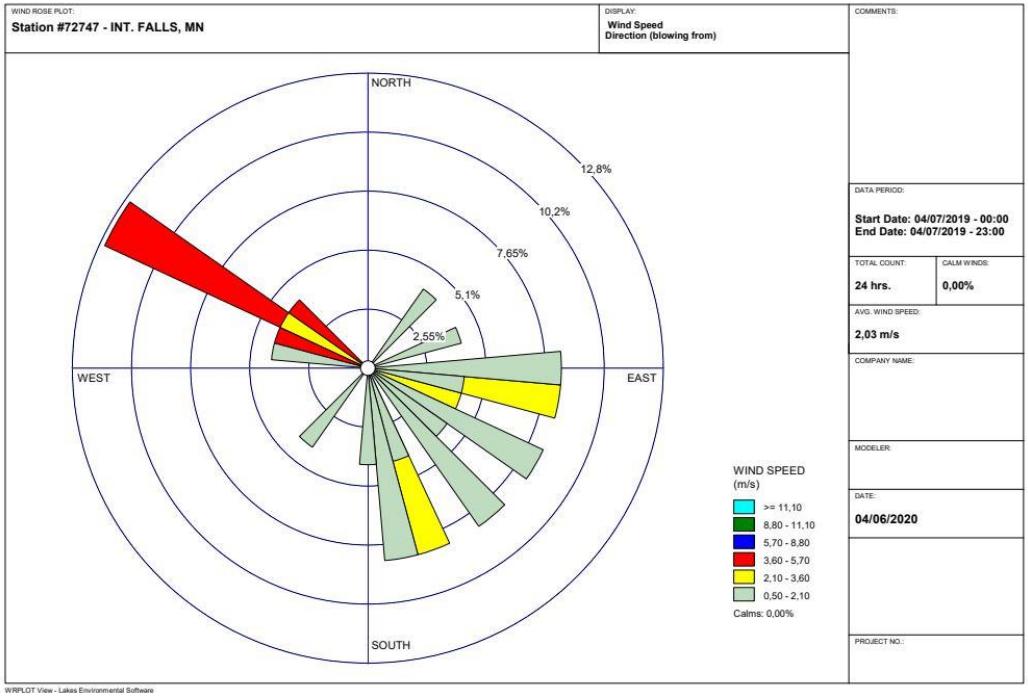
Tahun	Bulan	Tanggal	Jam	Arah	Kecepatan
2019	7	8	19	180°	0.5 m/s
2019	7	8	20	190°	0.5 m/s
2019	7	8	21	70°	1.5 m/s
2019	7	8	22	50°	1.5 m/s
2019	7	8	23	200°	1 m/s
2019	7	8	24	200°	1 m/s
2019	7	8	19	180°	0.5 m/s
2019	7	8	20	190°	0.5 m/s
2019	7	8	21	70°	1.5 m/s
2019	7	8	22	50°	1.5 m/s
2019	7	8	23	200°	1 m/s
2019	7	8	24	200°	1 m/s

(Sumber: Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika)

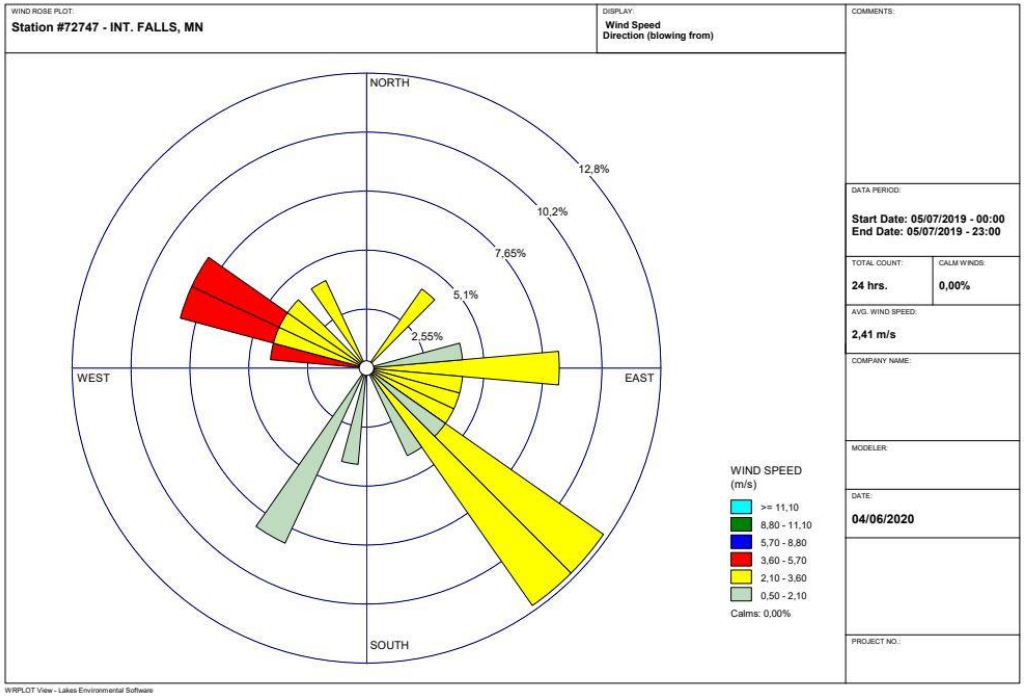
Lampiran 12. *Wind Rose* Pada Tanggal 3 Juli 2019



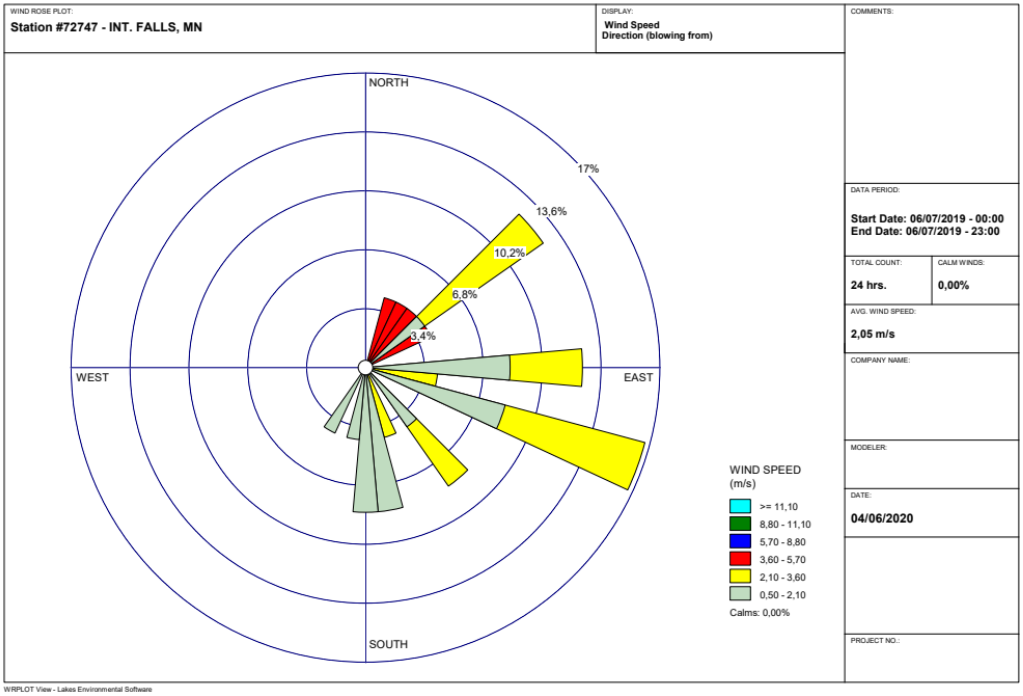
Lampiran 13. *Wind Rose* Pada Tanggal 4 Juli 2019



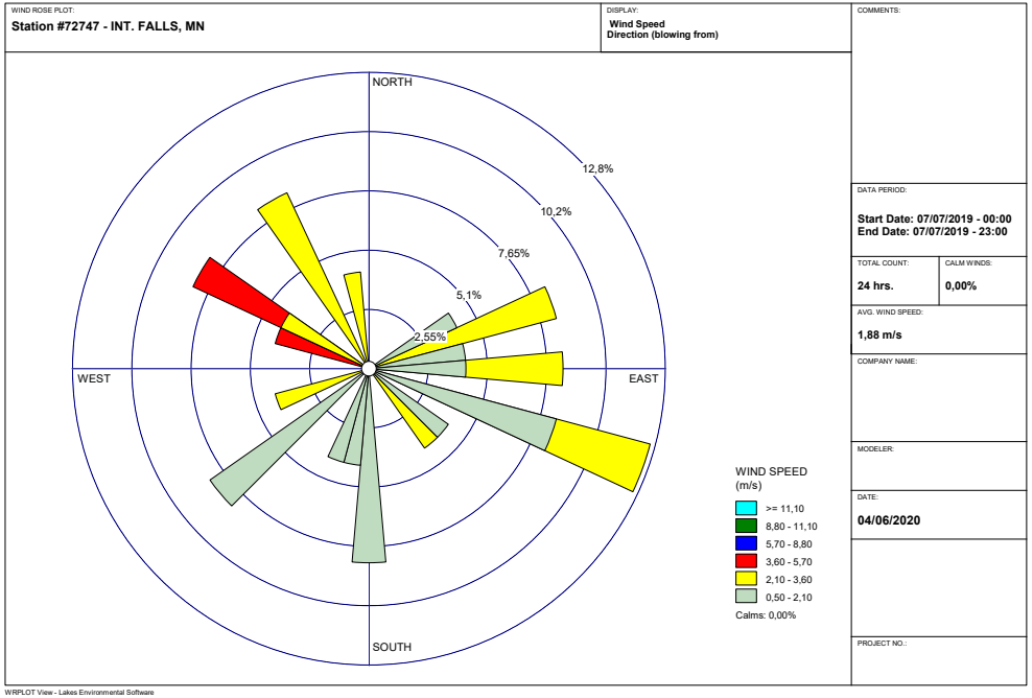
Lampiran 14. *Wind Rose* Pada Tanggal 5 Juli 2019



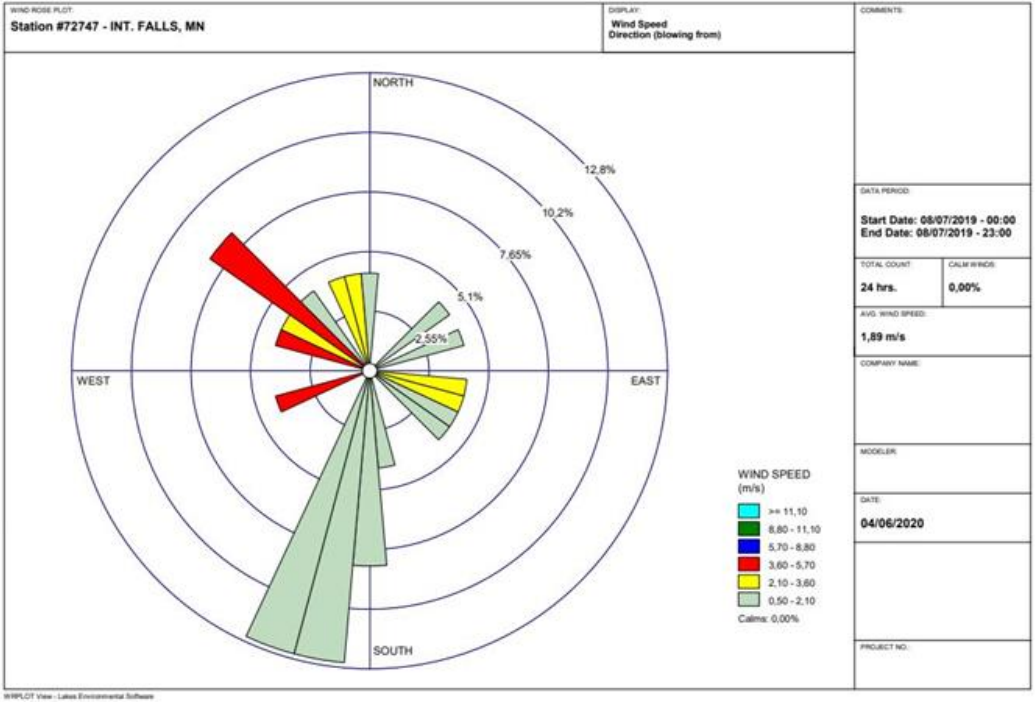
Lampiran 15. *Wind Rose* Pada Tanggal 6 Juli 2019



Lampiran 16. *Wind Rose* Pada Tanggal 7 Juli 2019



Lampiran 17. *Wind Rose* Pada Tanggal 8 Juli 2019



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS

Penulis dengan nama lengkap Yustinus Batistuta Yudhit Christantyo, lahir di Tangerang pada 17 Maret 1998. Penulis menempuh Pendidikan di SD Strada Slamet Riyadi I Tangerang, SMP Negeri 6 Tangerang, dan SMA Negeri 5 Tangerang. Penulis melanjutkan Pendidikan dengan program sarjana (S1) di Departemen Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Sipil pada tahun 2016 dengan NRP 03111640000160. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dibeberapa kepanitian diantaranya Civil Expo 2018 dan ITS Open cabang bulutangkis. Penulis menyelesaikan gelar sarjananya melalui Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pola Pergerakan Pesawat Terhadap Beban Emisi Karbon Bandar Udara Sultan Hasanuddin”. Apabila pembaca ingin memberi kritik dan saran serta diskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email: yudhit.17@gmail.com

“Halaman ini sengaja dikosongkan”