



DISERTASI RE143561

PENDEKATAN BARU MODEL DISTRIBUSI PENCEMAR DI ATMOSFER PERKOTAAN

Abdu Fadli Assomadi
3312 301 003

PROMOTOR:
Prof. Ir. Joni Hermana, MScES., Ph.D.
Prof. Drs. Basuki Widodo, MSc., Ph.D.

PROGRAM DOKTOR
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

**PENDEKATAN BARU MODEL DISTRIBUSI PENCEMAR DI ATMOSFER
PERKOTAAN**

**NEW APPROACH OF URBAN ATMOSPHERIC POLLUTANT
DISTRIBUTION MODEL**

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Doktor (Dr.)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :

Abdu Fadli Assomadi
NRP. 3312 301 003

Tanggal Ujian : 19 September 2016
Periode Wisuda: Maret 2017

Disetujui oleh Tim PPUKD:

1. **Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.E.S., Ph.D.** (Ketua Tim Pembimbing)
NIP: 19600618 198803 1 002
2. **Prof. Drs. Basuki Widodo, M.Sc., Ph.D.** (Co-Pembimbing)
NIP: 19650605 198903 1 002
3. **Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc.** (Penguji Internal)
NIP: 19550128 198503 2 001
4. **Dr. Ali Masduqi, ST., MT.** (Penguji Internal)
NIP: 19680128 199403 1 003
5. **Prof. Ir. Puji Lestari, Ph.D.** (Penguji Eksternal)
NIP: 19600527 198803 2 001

Direktur Program Pascasarjana,



Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D.
NIP. 19601202 198701 1 001

KATA PENGANTAR

Bismillaahirrahmaanirrahiim,

Alhamdulillah rabbil ‘aalamiin. Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan disertasi ini sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan Program Doktor Teknik Lingkungan ITS. Shalawat dan salam untuk junjungan penulis, Rasulullah Muhammad SAW, yang membawa petunjuk bagi semua umat dan rahmat bagi seluruh alam. Disertasi ini diselesaikan dengan judul “Pendekatan Baru Model Distribusi Pencemar Udara di Atmosfer Perkotaan” semoga dapat bermanfaat dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan dapat diaplikasikan dalam pengelolaan lingkungan khususnya pencemaran udara perkotaan.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D. (promotor) dan Prof. Basuki Widodo, MSc., Ph.D. (co-promotor) atas arahan, bimbingan, dan tauladan yang diberikan kepada penulis, sehingga penelitian dan disertasi ini dapat diselesaikan, serta meningkatnya kualitas dan sikap akademik penulis. Pengorbanan beliau berdua sebagai guru tidak mungkin bisa dibalas oleh penulis. Semoga Allah membalas beliau berdua dan semua guru-guru penulis dengan kebaikan yang berlimpah, dunia akhirat.

Secara khusus penulis juga menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Menteri Pendidikan Nasional 2012 – 2015 dan Menteri Riset dan Pendidikan Tinggi, Dirjen Dikti, Rektor ITS, direktur PPS_ITS atas ijin dan fasilitas studi serta beasiswa BPP-DN yang diterima penulis selama 4 tahun melakukan studi, penelitian, dan menyusun disertasi.
2. Kepala Laboratorium Pengelolaan Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim (LPPUPI) ITS Periode 2011-2015, Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D. atas support data laboratorium, dan pendanaan untuk kelancaran studi, riset dan publikasi ilmiah bagi penulis.

3. Pemerintah Kota Surabaya, Bakesbangpol linmas Kota Surabaya, BLH Kota Surabaya, dengan semua dukungan penyediaan data skunder untuk verifikasi model yang dikembangkan penulis.
4. Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, MSc., Prof. Ir. Puji Lestari, Ph.D (FTSL-ITB), dan Dr. Ali Masduqi, MT atas bimbingan, arahan, dan perbaikan bagi penulis dalam proses penyusunan disertasi ini.
5. Dekan FTSP, Ketua Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS, beserta semua staf, semua guru dan senior penulis di Jurusan Teknik Lingkungan dan kolega.
6. Rekan-rekan peserta Program Doktor Teknik Lingkungan ITS yang pernah studi bersama penulis antara lain: Dr. Hardianto, Dr.Cd. Junaidi, Dr.Cd. Masrullita, Dr. F. Rooslan Edy, Dr.Cd. Husni Kotta, dan yang lainnya.

Banyak hal yang harus disempurnakan dalam setiap usaha dan karya, maka penulis memohon saran, kritik dan penyempurnaan ilmu dari setiap pembaca untuk kemanfaatan dan perbaikan kualitas penulis. Terima kasih.

Surabaya, Desember 2016

Penulis

---o0o---

Tidakkah kamu perhatikan
Sesungguhnya Allah telah menundukkan untuk (kepentingan)mu
apa yang di langit dan apa yang di bumi
dan menyempurnakan untukmu nikmat-Nya lahir dan batin.
Dan di antara manusia ada yang membantah tentang (keesaan) Allah tanpa ilmu
pengetahuan atau petunjuk dan tanpa kitab yang memberi penerangan

dan seandainya pohon-pohon di bumi menjadi pena dan laut (menjadi tinta),
ditambahkan kepadanya tujuh laut (lagi) sesudah (kering)nya, niscaya tidak akan
habis-habisnya (dituliskan) kalimat Allah.
Sesungguhnya Allah Maha Perkasa lagi Maha Bijaksana.

tidakkah kamu memperhatikan, bahwa Sesungguhnya Allah memasukkan malam ke
dalam siang dan memasukkan siang ke dalam malam dan Dia tundukkan matahari dan
bulan masing-masing berjalan sampai kepada waktu yang ditentukan, dan
Sesungguhnya Allah Maha mengetahui apa yang kamu kerjakan.

(QS Luqman 20, 27, 29)

Baktiku kepada kedua orang tuaku
Ayahanda Abdul Gani Widjaja dan Ibunda Nurhayati
Ayahanda M. Farchan Zain dan Ibunda (Almh) Fullah Anifah

Rasa cinta dan sayangku karena Allah SWT untuk
Istriku Qonitah Fardiyah
Anakku Muchammad Najmi Syarif Al-Baihaqi
Terima kasih atas semua kesabaran, dukungan, dan pengorbanannya...

PENDEKATAN BARU MODEL DISTRIBUSI PENCEMAR DI ATMOSFER PERKOTAAN

Nama mahasiswa : Abdu Fadli Assomadi
NRP : 3312 301 003
Pembimbing : Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D.
Prof. Drs. Basuki Widodo, MSc., Ph.D.

ABSTRAK

Data monitoring kualitas udara ambien merupakan aspek penting dalam perencanaan kebijakan pengelolaan pencemar udara perkotaan. Namun, keberadaan data monitoring saat ini nampaknya belum mencukupi untuk keperluan tersebut. Sehingga pengelolaan kualitas udara juga menjadi tidak optimal, seperti yang terjadi pada kota-kota besar di Indonesia yang masih tercatat kejadian kualitas udara ambien tidak sehat antara 2 – 18 hari dalam setahun. Di Kota Surabaya keterbatasan jumlah stasiun pemantau (7 SUF) dan tidak dioperasikannya secara optimal menjadi masalah utama dalam penyediaan data yang dimaksud. Dalam 10 tahun terakhir, hanya 1, 2 atau 3 SUF saja yang pernah dioperasikan secara bersama menyediakan data monitoring. Idealnya untuk kota Surabaya diperlukan 5 – 13 stasiun pemantau kualitas udara yang dioperasikan secara bersamaan dan terus menerus sesuai kriteria yang ditentukan.

Di samping pengoperasian stasiun pemantau udara, penggunaan model distribusi pencemar udara merupakan salah satu alternatif dalam penyediaan data, estimasi sebaran (pemetaan), dan evaluasi sumber sebagai dasar kebijakan pengelolaan. Beberapa model distribusi pencemar di atmosfer telah banyak dikembangkan dengan asumsi-asumsi umum, dispersi searah (sumbu-x), dan stabilitas atmosfer yang diestimasi secara terpisah. Model-model tersebut memerlukan banyak analisis pendukung dari data monitoring meteorologi lokal dan memerlukan banyak pendekatan.

Dalam penelitian ini dilakukan pendekatan baru untuk menghasilkan model dispersi pencemar di atmosfer perkotaan. Pendekatan ini menggunakan konsep konveksi-difusi kontinuitas Navier-Stokes dan pendekatan Boussinesq yang diverifikasi dengan data meteorologi lokal perkotaan (radiasi, arah dan kecepatan

angin) dan kualitas pencemar (sumber dan penerima/ambien). Model yang dihasilkan dapat diaplikasikan secara umum untuk sumber pencemar konservatif. Sedangkan untuk pencemar non konservatif (seperti NO₂ dan O₃), model kinetika ditambahkan dengan pendekatan laju reaksi order satu sensitif terhadap intensitas radiasi pada sisa pencemar di udara. Persamaan-persamaan dasar dari proses ini diselesaikan dengan prinsip distribusi normal menurut *invers* Fourier. Pendekatan geometri matematik dan sifat akumulasi pencemar dalam media digunakan dalam penyelesaian akhir untuk menghasilkan model dispersi pencemar multi sumber. Model pendekatan ini selanjutnya digunakan untuk mengestimasi distribusi pencemar dari banyak sumber sesuai data rekaman kota Surabaya. Verifikasi terhadap hasil dilakukan dengan 1) membandingkan hasil estimasi model dan model terdahulu (Model Gauss); dan 2) membandingkan hasil estimasi model dengan data lapangan sesuai kriteria EPA.

Hasil pendekatan dalam penelitian ini adalah model dispersi pencemar di atmosfer yang terintegrasi dengan *mixing height*, kestabilan atmosfer perkotaan, sensitif terhadap perubahan intensitas radiasi, temperatur permukaan, perubahan arah dan kecepatan angin, serta dipengaruhi kinetika reaksi untuk pencemar *non-konservatif*. Konstanta kinetika reaksi pencemar di atmosfer didasarkan pada reaksi fotokimia yang dipengaruhi oleh ketersediaan radiasi matahari dan sisa pencemar di atmosfer (terukur di ambien). Berdasar data radiasi dan pencemar di kota Surabaya, didapatkan konstanta kinetika pencemar NO₂ untuk musim penghujan dan kemarau sebesar 1.1044 dan 0.9466 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)²/*watt*. Verifikasi model dihasilkan dengan model dispersi Gauss menghasilkan konstanta kestabilan terintegrasi pada model yang dipengaruhi oleh kecepatan dan jarak dispersi. Verifikasi model dengan data monitoring Kota Surabaya telah memberikan hasil yang dekat dengan rekomendasi EPA (korelasi 0,572 dan simpangan 72 %). Korelasi dan simpangan model terhadap data lapangan menunjukkan masing-masing 0,52 – 0,76 dan 36 % di SUF4, 0,69 dan 162 % di SUF1, serta 0,61 dan 14,7 % di SUF3.

Kata kunci: *mixing height*, kualitas udara ambien, persamaan kontinuitas, persamaan Navier-Stokes, pendekatan Boussinesq, stabilitas atmosfer, konveksi-difusi

NEW APPROACH OF URBAN ATMOSPHERIC POLLUTANT DISTRIBUTION MODEL

Name : Abdu Fadli Assomadi
Student ID : 3312 301 003
Promotor : Prof. Ir. Joni Hermana, MSc.ES., Ph.D.
Prof. Drs. Basuki Widodo, MSc., Ph.D.

ABSTRACT

Data of ambient air quality monitoring is an important aspect in designing management of urban air pollutant. However, the existence of recent air monitoring stations in many cities is inadequate to provide the required data for this purpose. This shows that many big cities in Indonesia including Surabaya still have unhealthy ambient air ranging between 2 – 18 days every year. Limited number of monitoring stations (7 SUF) and not optimally operated are the major problem in the provision of data. Over the last ten years, only 1 - 2 or 3 of all SUF has ever been simultaneously operated in providing monitoring data. Ideally for Surabaya, at least 5 – 13 continuous monitoring stations are required for being simultaneously operated in appropriate criteria for the purpose of providing data

Beside of monitoring station, the air pollution distribution model can be used as an alternative methods for providing data, estimation of distribution (mapping), evaluation, and basic management policy. Several models have been developed in one direction disperse (in x-assumed array), and general atmospheric stability which are estimated separately. To execute these models are required many approaches and resources to support local meteorological analysis, therefore they are less practical when being applied.

In this study, a new approach based on convection-diffusion concept, continuity equation (of Navier-Stokes) and Boussinesq approximation is conducted for urban atmospheric pollutant dispersion. The model result is verified with meteorological data and ambient quality monitored. In general, this model can be applied for conservative pollutant. For non-conservative pollutant (such as NO₂ and O₃ gasses), the kinetic approach must be added to the model. The kinetic is

first order photo reaction for remaining pollutant and depending on radiation intensity. All of the resulted equations are solved by the principles of normal distribution according to the Fourier invers producing dispersion model for single source. The geometrical approach and pollutant accumulation principle are applied to generate dispersion model for multiple-source. Verification of the model results is conducted by comparing the estimation results of model 1) to the previous model (Gaussian model); and 2) to the field data according to the criteria of EPA.

The results of the approach are the atmospheric pollutant dispersion model integrated with the mixing height, urban atmospheric stability, sensitive to radiation intensity, surface temperature, wind direction and speed changes, and also kinetics for non conservative pollutant. The kinetics constant are determined in scope of photochemical reaction of remaining pollutant and radiation intensity provided. Based on the data of radiation and pollutants in Surabaya city, kinetic constants for NO₂ are obtained for 1.1044 and 0.9466($\mu\text{g}/\text{m}^2$)²/watt on both rainy and dry seasons. Verification of resulted model with Gauss dispersion produce the stability constants integrated on resulted model. This constant was sensitive to the win speed and dispersion distance. Verification of resulted model with monitoring data from Surabaya was close to EPA recommendation (0.572 correlation and 72 % deviation). The correlation and deviation of model and data showed 0.52 to 0.76 and 36% for SUF4; 0.69 and 162% for SUF1; 0.61 and 14.7% for SUF3.

Key words: mixing height, ambient air quality, Navier-Stokes continuity equation, Boussinesq approach, atmospheric stability, convection-diffusion.

Beberapa output dalam penelitian ini antara lain:

- Model profil vertikal atmosfer yang dihubungkan dengan energi radiasi dan kecerahan atmosfer. Pembahasan tentang hal ini dapat dilihat pada sub bab 4.1. Hasil ini telah dipublikasikan dalam “Seminar Nasional Teknologi Lingkungan XII – ITS, 3 September 2015” dengan judul makalah ”Penentuan Indeks Kecerahan Atmosfer Perkotaan Berdasarkan Data Series Pengukuran Intensitas Radiasi Global Harian (Studi Kasus Kota Surabaya, Indonesia)”.
- Pendekatan model dispersi kontaminan di atmosfer hasil pendekatan hukum konservasi zat (Navier-Stokes) dalam struktur atmosfer dan pendekatan Boussinesq, Model ini juga dipengaruhi oleh sifat reaktifitas dalam fotokimia zat-zat non konservatif. Pembahasan tentang masalah ini ada pada sub bab 4.4 dan 4.5. Hasil telah dipublikasikan dalam “*International Journal of ChemTech Research*, volume 9 nomor 7, halaman 182-190, *Scopus Index*”, dirilis pada 13 Agustus 2016, dengan judul artikel “The Kinetic Approach of NO_x Photoreaction Related to Ground Measurement of Solar Radiation in Estimates of Surface Ozone Concentration”.
- Verifikasi dengan model Gauss memberikan hasil yang dekat pada rentang stabilitas atmosfer tipe A, B, C, dan D dengan korelasi $R = 0,87$ dan simpangan sebesar 8,8 dari data maksimum bernilai 60. Pada verifikasi ini juga diperoleh konstanta yang lebih umum dari koefisien dispersi Gaussian. Model yang dihasilkan tidak tergantung stabilitas Pasquill seperti model Gauss. Konstanta yang diperoleh dari model ini berhubungan kuat dengan kecepatan angin dan gravitasi dan telah mencakup perubahan kestabilan atmosfer. Penggunaan konstanta ini pada model terbangun secara operasional lebih sederhana dan tidak banyak memerlukan analisis.
- Setidaknya 2 artikel jurnal internasional yang sedang dalam progress publikasi antara lain:
 1. Determination of Urban Atmosphere Characteristic Constant Based on the Monitoring Data Series of Radiation Intensity and pollutant
 2. New Approach from mathematical principles for integrated atmospheric stability and dispersion of distribution models of pollutant in atmosphere.

---o0o---

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	ix
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN.....	xxvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	7
1.3. Tujuan Penelitian.....	7
1.4. Ruang Lingkup dan Asumsi Penelitian	8
1.4.1. Ruang Lingkup Penelitian.....	8
1.4.2. Asumsi Penelitian	8
1.5. Kontribusi Penelitian.....	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1. Radiasi Matahari dan Pemanasan Atmosfer.....	11
2.2. Planetary Boundary Layer dan Mixing Height	12
2.3. Metode-metode Referensi menentukan MH	13
2.3.1. Metode Estimasi MH Berdasar Pengukuran Tidak Langsung.....	13
2.3.1.1. Ceilometer.....	13
2.3.1.2. Radiosonde.....	14
2.3.2. Metode Diagnostik untuk Menentukan MH Situasi Stabil	14
2.4. Dasar Dinamika Atmosfer.....	17
2.5. Lapisan Batas Planetary dan Mixing Height Perkotaan.....	19
2.6. Prinsip Dasar Distribusi Transfer Massa Pencemar di atmosfer.....	21
2.6.1. Difusi Transfer Massa Pencemar	21
2.6.2. Termodinamika Atmosfer.....	24
2.6.3. Kekekalan Massa dan Spesies	27
2.6. Model-model Dispersi Pencemaran Udara Perkotaan.....	29
2.7. Kinetika Reaksi Kimia	33

4.2.1.1.	Tekanan Atmosfer.....	88
4.2.1.2.	Temperatur Atmosfer.....	91
4.2.2.	Bouyancy, koreksi temperature dan tekanan karena perubahan keadaan fasa.....	93
4.2.3.	Developing Perubahan Profil Temperatur Atmosfer dalam Siklus Harian.....	97
4.3.	Mixing Height	99
4.3.1.	Pengaruh kuat radiasi global terhadap suhu permukaan atmosfer/tekanan, profil temperature/tekanan, dan mixing height.....	101
4.3.2.	Budget energi pada atmosfer bumi dan efek rumah kaca	102
4.3.3.	Aplikasi model budget energi, pada perubahan temperatur permukaan maksimum di Surabaya	104
4.3.4.	Model temperatur minimum atmosfer permukaan	106
4.3.5.	Profil intensitas radiasi dan temperatur tergantung waktu.....	107
4.3.6.	Model temperatur atmosfer karena Emisi induksi menggunakan konsep budget energi.....	109
4.3.7.	Perubahan profil temperatur dan mixing height bergantung waktu.....	112
4.4.	Formulasi Hukum Konservasi Zat dalam Struktur Atmosfer	113
4.4.1.	Penurunan Persamaan Advectif atau meterial	115
4.4.2.	Penerapan Persamaan Navier-Stokes Untuk Menggambarkan Pola Aliran Atmosfer	117
4.4.2.1.	Konservasi Massa (Keseimbangan Massa dalam Aliran Fluida).....	117
4.4.2.2.	Konservasi Momentum.....	118
4.4.2.3.	Konservasi Medan Magnet	120
4.4.2.4.	Konservasi Energi.....	121
4.4.3.	Pendekatan Analisis untuk Penyelesaian Persamaan yang Dihasilkan Sebelumnya	123
4.4.4.	Pendekatan Boussinesq.....	125
4.4.5.	Pendekatan Model Dispersi Pencemar di Permukaan	127
4.4.5.1.	Distribusi konsentrasi spasial awal (di sumber).....	129
4.4.5.2.	Distribusi dari sumber transient, dan pembatas dengan tidak ada fluks padanya.....	133
4.4.5.3.	Pendekatan model disperse pada kontaminan di atmosfer	134

4.5.	Pendekatan Kinetika zat non konservatif untuk Model yang dihasilkan pada Atmosfer Kota Surabaya.....	135
4.5.1.	Profil Pencemaran dan nilai ISPU dalam rentang harian	135
4.5.2.	Kajian Kinetika Pencemar Udara di Perkotaan dihubungkan dengan GRAD, kasus ozon permukaan.....	137
4.5.2.1.	Profil perubahan konsentrasi ozon permukaan.....	138
4.5.2.2.	Hubungan parameter-parameter kajian untuk prediksi kinetika pembentukan ozon permukaan melalui fotoreaksi kimia.....	142
4.5.2.3.	Aplikasi Kinetika-Matematika Data Kota Surabaya	145
4.6.	Dispersi Pencemaran Udara dalam arah dan besar kecepatan angin homogen.....	148
4.6.1.	Model Dispersi dari Sumber Titik.....	149
4.6.2.	Model Dispersi dari Sumber Garis	150
4.6.3.	Transformasi Koordinat Kartesius, mengikuti arah vector angin untuk point source.	151
4.6.3.1.	Sumber titik	151
4.6.3.2.	Sumber Garis	153
4.6.4.	Rekap dan penerapan model dispersi pencemar atmosfer dari point source dan line source kontinyu	154
4.6.5.	Menjalankan model point source dengan program MATLAB.....	155
4.6.5.1.	Model sumber titik pada aplikasi MATLAB.....	155
4.6.5.2.	Model sumber garis pada aplikasi MATLAB	160
4.6.5.3.	Model multi sumber point dan multi garis aplikasi MATLAB	163
4.7.	Verifikasi Model Terbangun.....	165
4.7.1.	Verifikasi dengan teori dispersi dan kajian analisis	165
4.7.2.	Verifikasi ilmiah terhadap model terbangun dengan pengaruh multi sumber.....	168
4.7.3.	Verifikasi dengan model dispersi gaussian	172
4.7.3.1.	Hasil estimasi menggunakan model dispersi Gaussian	173
4.7.3.2.	Hasil estimasi menggunakan model dispersi terbangun.....	175
4.7.3.3.	Hasil estimasi tingkat error dan korelasi hasil perhitungan model dispersi Gaussian dengan model dispersi terbangun.....	178
4.8.	Estimasi jumlah grid optimum dalam iterasi	180
4.8.1.	Penentuan jumlah grid untuk mendapatkan resolusi yang baik pada pola sebaran dispersi	181

4.8.2.	Penentuan jumlah grid untuk mendapatkan nilai yang stabil pada hasil estimasi yang baik pada pola sebaran dispersi (ketelitian hasil perhitungan)	182
4.8.3.	Penentuan jumlah grid untuk mendapatkan waktu perhitungan yang efisien pada hasil estimasi yang baik pada pola sebaran dispersi (ketelitian hasil perhitungan)	185
4.9.	Estimasi simpangan model terhadap rekaman data pengukuran.....	186
4.9.1.	Penentuan korelasi model dengan data pengukuran	187
4.9.2.	Penentuan korelasi dan simpangan (error) hasil estimasi dibanding data pengukuran	191
4.10.	Aplikasi model terbangun untuk estimasi pola dispersi pencemar NO ₂ di Kota Surabaya.	193
4.10.1.	Penentuan data pembanding yang digunakan untuk verifikasi model terbangun.....	194
4.10.2.	Ketersediaan data pendukung dan inputan model terbangun	195
4.10.2.1.	Data pendukung untuk perhitungan emisi, dispersi dan pengaturan batasan model dispersi	197
4.10.2.2.	Peta tata guna lahan, Sumber Emisi Area.....	198
4.10.2.3.	Volume traffic Kota Surabaya dan sumber emisi garis	200
4.10.2.4.	Data industri dan sumber emisi titik	201
4.10.3.	Aplikasi time series model terbangun.....	202
4.10.4.	Hasil estimasi model terbangun	203
4.10.5.	Korelasi dan Simpangan estimasi model terbangun dengan data pengukuran	208
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		213
5.1	Kesimpulan.....	213
5.2	Saran	213
DAFTAR PUSTAKA.....		215
DAFTAR LAMPIRAN		223

---o0o---

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Persamaan Algoritma Diagnostik untuk Mengestimasi MH	16
Tabel 2.2	Indikator statistik model-data dan simulasi n elemen.....	35
Tabel 3.1	Perkembangan Penelitian UBL, PBL, dan Mixing Height	39
Tabel 3.2	Jenis data, kurun waktu dan sumber	44
Tabel 4.1	Data Standar Atmosfer pada elevasi $z=0$ (permukaan)	62
Tabel 4.2	Perbandingan hasil model temperatur dan tekanan atmosfer dengan data International Standard Atmosphere (ISA) dan data rata-rata untuk Surabaya	63
Tabel 4.3	Hasil Estimasi Konsentrasi, Densitas, dan Volume Molar Atmosfer	66
Tabel 4.4	Parameter dalam perhitungan perubahan intensitas radiasi matahari bidang datar permukaan	71
Tabel 4.5	Perhitungan perubahan intensitas radiasi matahari bidang datar permukaan	71
Tabel 4.6	Perbandingan data pengukuran dengan model awal	72
Tabel 4.7	Intensitas radiasi sesuai dengan waktu dari data-data terpilih	77
Tabel 4.8	Intensitas radiasi sesuai waktu pada data terpilih	78
Tabel 4.9	Korelasi dan slope (k) data terpilih dan estimasi model	80
Tabel 4.10	Resume nilai korelasi dan slope hasil 4 tahap analisis	82
Tabel 4.11	Intensitas Radiasi (W/m^2) – estimasi model-terkoreksi	83
Tabel 4.12	Korelasi dan slope (k) data terpilih dan estimasi model terkoreksi	85
Tabel 4.13	Nilai-nilai estimasi tekanan, temperatur ($k = 1; 2.35; \text{ dan } 3.63$), ISA, data Surabaya	89
Tabel 4.14	Hasil kalibrasi temperatur dengan aplikasi tekanan sebagai fungsi altitude dan buoyancy dibandingkan dengan data Surabaya.....	96
Tabel 4.15	Estimasi mixing height berdasar data Surabaya dan model terkalibrasi, 1 Januari 2010 pukul 00.00.....	100
Tabel 4.16	Hasil estimasi temperatur berdasarkan GRAD monitoring untuk Surabaya 1 Januari 2010	110
Tabel 4.17	Nilai Prandtl Number untuk beberapa material	126
Table 4.18	Rata-rata GRAD, sisa $[NO_2]$, dan $[O_3]$ dalam fase 1	146
Tabel 4.19	Parameter disusun untuk verifikasi model dispersi dari sumber titik	173

Tabel 4.20	Hasil estimasi σ_y , σ_z (m) dan konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pencemar di titik penerima menggunakan persamaan Gaussian173
Tabel 4.21	Hasil estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) menggunakan persamaan model terbangun ($C_n = C$ pada kecepatan angin n m/s)177
Tabel 4.22	Perubahan nilai estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) terhadap data SUF4 dan waktu iterasi model dengan variasi grid184
Tabel 4.23	Data kecepatan dan arah angin, GRAD, serta konsentrasi pencemar NO_2 yang terekam pada SUF-4188
Tabel 4.24.	Parameter penting dan Beban pencemar dari sumber beserta referensi189
Tabel 4.25	Hasil estimasi konsentrasi pencemar NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) titik lokasi SUF-4190
Tabel 4.26	Ketersediaan Data NO_2 Kota Surabaya dalam rantang 2010 – 2014194
Tabel 4.27	Parameter dominan estimasi dispersi model terbangun197
Tabel 4.28	Nilai pengaturan model terbangun197
Tabel 4.29	Penentuan koordinat dan batas wilayah pemodelan198
Tabel 4.30	Contoh inputan untuk sumber emisi area199
Tabel 4.31	Jenis Permukiman, Penggunaan Bahan Bakar, dan luasan rata-rata, Kota Surabaya200
Tabel 4.32	Hasil Perhitungan besar emisi NO_2 per jenis rumah200
Tabel 4.33	Volume trafik rata-rata dan faktor emisi NO_2 satuan mobil penumpang201
Tabel 4.34	Contoh inputan untuk line source model terbangun201
Tabel 4.35	Inputan untuk sumber titik pada model terbangun202

---o0o---

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram proses, aliran, dan skala yang ada dalam PBL dan UBL	21
Gambar 2.2	Gradien konsentrasi dalam perubahan posisi x	23
Gambar 2.3	Konsep parcel udara dalam tinjauan termodinamika	25
Gambar 2.4	Ilustrasi difusi spesies A dalam volume kontrol	27
Gambar 2.5	Ilustrasi difusi dan perubahan fluks spesies A dalam diagram Cartesian	28
Gambar 3.1	Metode-metode untuk mengestimasi MH perkotaan.....	41
Gambar 3.2	Konsep Pembuatan Model dalam Penelitian	43
Gambar 3.3	Asumsi profil siklus perubahan kelimpahan gas di atmosfer perkotaan	48
Gambar 3.4	Diagram proses membangun model estimasi tinggi lapisan percampuran (mixing height).....	50
Gambar 3.5	Layout sumber emisi dan volume kontrol	51
Gambar 3.6	Layout volume kontrol dalam kesetimbangan massa dan difusi	52
Gambar 3.7	Diagram proses membangun model distribusi pencemar di perkotaan	55
Gambar 3.8	Proses verifikasi model terbangun	56
Gambar 4.1	Kesetimbangan gaya pada molekul gas di atmosfer	60
Gambar 4.2	Perbandingan profil temperatur dan tekanan model adiabatik, data rata-rata Surabaya, dan ISA	65
Gambar 4.3	Perubahan waktu, intensitas radiasi (S_0), radiasi permukaan (S_s) dihasilkan oleh model awal	72
Gambar 4.4	Perbandingan data pengukuran intensitas radiasi dengan estimasi ($k=1$) untuk 1 januari 2010	72
Gambar 4.5	(a) estimasi model-awal radiasi dan (b) data mingguan pengukuran radiasi permukaan Surabaya januari-desember 2010 pada mulai tanggal 1 januari.	74
Gambar 4.6	Radiasi maksimum dan radiasi saat zenith sepanjang tahun 2010 model dan data	75
Gambar 4.7	Korelasi estimasi dan data pada saat zenith dan radiasi maksimum	76
Gambar 4.8	Korelasi estimasi dan data pada saat musim hujan dan kemarau	77

Gambar 4.9	Perbandingan hasil estimasi dan data dengan tutupan awan minimal (musim hujan)	79
Gambar 4.10	Perbandingan hasil estimasi dan data dengan tutupan awan minimal (musim kemarau)	80
Gambar 4.11	Korelasi estimasi dan data dengan tutupan awan minimal musim hujan dan musim kemarau	81
Gambar 4.12	Korelasi estimasi model awal dan data pengukuran radiasi Januari – Desember 2010	82
Gambar 4.13	Perbandingan hasil estimasi terkoreksi dan data dengan tutupan awan minimal (musim hujan)	84
Gambar 4.14	Perbandingan hasil estimasi dan data dengan tutupan awan minimal (musim kemarau)	84
Gambar 4.15	Korelasi estimasi dan data dengan tutupan awan minimal musim hujan (atas) dan musim kemarau (bawah)	85
Gambar 4.16	Kesetimbangan energi pada volume kontrol di atmosfer	87
Gambar 4.17	Profil tekanan (P) model adiabatik terkalibrasi, ISA, dan data Surabaya	90
Gambar 4.18	Profil Temperatur (T) model adiabatik terkalibrasi, ISA, dan data Surabaya	92
Gambar 4.19	Temperatur model terkoreksi $P=f(z)$ dan buoyancy parcel udara	96
Gambar 4.20.	Hasil estimasi profil temperatur terelvasi	97
Gambar 4.21.	Profil temperatur data pengukuran permukaan dan estimasi dengan random tutupan mendung (10-40 %)	98
Gambar 4.22	Analisis grafik untuk mengestimasi mixing height (1 Januari 2010, 00:00)	101
Gambar 4.23	Toy Model untuk efek rumah kaca (Sportisse, 2008) telah dimodifikasi	103
Gambar 4.24	Skema model Toy, untuk budget radiasi termonitoring maksimum tinggi (900 W/m^2)	105
Gambar 4.25	Skema model Toy, untuk budget radiasi termonitoring maksimum rendah (700 W/m^2)	105
Gambar 4.26	Profil temperatur hasil monitoring Surabaya tahun 2010.....	106
Gambar 4.27	Skema model Toy, untuk budget radiasi termonitoring minimum (0 W/m^2)	106
Gambar 4.28	Temperatur dan GRAD atmosfer permukaan terukur pada 1 Januari 2010	107
Gambar 4.29	Absorpsi Energi, Emisi Induksi dan Emisi Spontan (Fruede, 2006)	108
Gambar 4.30	Generalisasi konsep budget energi di atmosfer permukaan bumi	109

Gambar 4.31	Profil temperatur permukaan dimodelkan dari data monitoring GRAD, dan data monitoring temperatur tiap 30 menit selama sehari	111
Gambar 4.32	Profil temperatur permukaan dari model-GRAD, dan data monitoring temperatur tiap 30 menit selama sehari	111
Gambar 4.33	Model Evolusi Mixing Height dalam 24 jam berdasarkan T-data monitoring	112
Gambar 4.34	Posisi dan konsentrasi partikel terbatas yang bergerak setiap tahap $+\Delta x$ per tahap waktu Δt	129
Gambar 4.35	Skema adveksi-difusi dalam satu dimensi. Garis putus-putus menunjukkan konsentrasi maksimum aliran plume kontaminan sebagai fungsi waktu dan jarak	130
Gambar 4.36	Distribusi konsentrasi kontaminasi	131
Gambar 4.37	Difusi setelah satu tahap-fungsi dari kondisi awal	132
Gambar 4.38	Skema pembatas tanpa fluks, distribusi normal dan pencerminan distribusi imajiner (garis putus-putus) dan penyelesaian superposisi (garis tidak putus-putus) merupakan jumlah dari massa distribusi dan imajiner pada posisi yang sama	133
Gambar 4.39	Skema pembatas tanpa fluks, distribusi normal dan pencerminan distribusi imajiner (garis putus-putus) di atmosfer	134
Gambar 4.40	Profil Indeks Pencemar parameter ISPU dan nilai ISPU maksimum harian Januari 2010	136
Gambar 4.41	Profil perubahan $[O_3]$, $[NO_2]$, dan GRAD pada musim kemarau (1 Januari 2010)	138
Gambar 4.42	Penyederhanaan deskripsi fase perubahan konsentrasi ozon dalam siklus harian	139
Gambar 4.43	Profil GRAD, NO_2 , ozon permukaan and dan rata-rata maksimum konsentrasi ozon musim kemarau (atas) dan musim hujan (bawah)	140
Gambar 4.44	Estimasi fluks radiasi matahari (atas), data observasi (tengah), dan nilai indeks kecerahan atmosfer (bawah) di Surabaya tahun 2010	141
Gambar 4.45	Pola konsentrasi maksimum ozone, NO_2 , dan GRAD	146
Gambar 4.46	Kecenderungan GRAD, $[NO_2]$, $[O_3]$ rata-rata dan regresi linear $[O_3] - \frac{hv_t}{[NO_2]_r}$ pada musim penghujan (atas) dan musim kemarau (bawah)	147
Gambar 4.47	Sistem koordinat kartesius dan kedudukan point source (S) dan receiptor (P)	151
Gambar 4.48	Sistem koordinat kartesius dan kedudukan line source (J) dan penerima (P)	153

Gambar 4.49	Contoh Peta dalam inputan model (AdminSby1.jpg)	156
Gambar 4.50	Penulisan script di command window MATLAB	157
Gambar 4.51	Gambar peta dan koordinat yang telah disesuaikan pada figure MATLAB	157
Gambar 4.52	Menulis perintah memanggil M-file command window	160
Gambar 4.53	Tampilan kontur diapersi pencemar satu sumber titik pada bidang x-y	160
Gambar 4.54	Tampilan contour diapersi pencemar dua sumber garis bidang x-y	163
Gambar 4.55	Tampilan contour diapersi pencemar multi source dengan arah dan kecepatan angin berbeda (atas $a = 60$, $s = 6$; bawah $a = 85$, $s = 4$)	164
Gambar 4.56	Perubahan pola distribusi konsentrasi pencemar pada penerima di permukaan karena perubahan jarak dan perubahan kecepatan angin	166
Gambar 4.57	Perubahan pola distribusi pencemar hasil estimasi model pada kecepatan angin 1, 3, 5, dan 7 m/s.	167
Gambar 4.58	Perubahan arah pola distribusi pencemar hasil estimasi model akibat perubahan arah angin	168
Gambar 4.59	Pola distribusi pencemar hasil estimasi model dan akumulasi akibat adanya beberapa sumber dalam aliran	170
Gambar 4.60.	Pola distribusi pencemar hasil estimasi model dan akumulasi akibat adanya beberapa sumber dalam aliran (atas) perubahan konsentrasi dalam pusat aliran dan kiri-kanan aliran (bawah) dengan arah angin tidak searah sumbu-x	171
Gambar 4.61	Pola Perubahan konsentrasi dengan jarak dispersi, kecepatan angin dan stabilitas atmosfer menurut model dispersi Gaussian	174
Gambar 4.62	Pola Perubahan konsentrasi dengan jarak dispersi, kecepatan angin menurut model awal dispersi terbangun	175
Gambar 4.63	Pola Perubahan konsentrasi dengan jarak dispersi, kecepatan angin menurut model dispersi terkalibrasi dengan fk	177
Gambar 4.64	Pola distribusi pencemar hasil estimasi model (atas), hasil estimasi Gaussian (tengah) dan korelasi serta nilai error (RMSE) model terbangun dengan Gauss (bawah)	179
Gambar 4.65	Resolusi pola distribusi pencemar hasil estimasi model pada variasi grid 10, 40, 70, 200, 300, 500, 800, dan 1000	183
Gambar 4.66.	Nilai estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) terhadap data SUF4 dan waktu iterasi model dengan variasi grid	185
Gambar 4.67	Pola dispersi estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pada 1 Januari 2010, 09:30 dan 14:30 WIB grid = 300	189

Gambar 4.68	Profil konsentrasi NO ₂ (data) dan GRAD terekam pada SUF-4, 1 Januari 2010	191
Gambar 4.69	Profil konsentrasi NO ₂ (model terbangun) dan GRAD (SUF-4), 1 Januari 2010	191
Gambar 4.70	Profil konsentrasi NO ₂ (model terbangun) dan data (SUF-4), 1 Januari 2010	192
Gambar 4.71	Peta tata guna lahan Kota Surabaya tahun 2010	198
Gambar 4.72	Pola perubahan trafik harian Kota Surabaya	203
Gambar 4.73.	Profil konsentrasi NO ₂ (model terbangun) dan data (SUF-4), 1-2 Januari 2010	204
Gambar 4.74.	Profil konsentrasi NO ₂ (model terbangun) dan data (SUF-4), 1-7 Januari 2010	205
Gambar 4.75.	Profil konsentrasi NO ₂ (model terbangun) dan data (SUF-4), 1-7 Maret 2012	206
Gambar 4.76	Profil konsentrasi NO ₂ (model terbangun) dan data (SUF-1), 1-7 Maret 2012	207
Gambar 4.77	Profil konsentrasi NO ₂ (model terbangun) dan data (SUF-3), 1-7 Maret 2012	208
Gambar 4.78	Profil konsentrasi NO ₂ (model terkalibrasi) dan data (SUF-1), 1-7 Maret 2012	210
Gambar 4.79	Profil konsentrasi NO ₂ (model terkalibrasi) dan data (SUF-3), 1-7 Maret 2012	210

---o0o---

DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH

θ_0	= sudut zenith,
$C_{A,e}$	= konsentrasi spesies A pada kesetimbangan
K_x	= konstanta umum persebaran pada sumbu – x
N_A''	= fluks absolut molar spesies A
$f_j(C)$	= fungsi konsentrasi pada aktivitas j, dari sumber j
k_{NO_2}	= konstanta kinetika fotokimia untuk gas NO ₂
Ψ_x	= fluks satu dimensi (arah sumbu x)
σ_y, σ_z	= koefisien dispersi pada arah horisontal (sumbu-y) dan arah vertikal (sumbu-z)
$\nabla^2 C$	= nabla tingkat dua terhadap C, diferensial tingkat dua C terhadap tiga arah sumbu, $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$
$\frac{\partial}{\partial t}$	= perubahan fluks terhadap perubahan waktu
[..]	= konsentrasi zat dalam sistem reaksi kimia
[..] ₀	= konsentrasi awal sebelum reaksi (initial concentration)
[..] _r	= konsentrasi sisa reaksi (remaining concentration)
[..] _t	= konsentrasi saat tertentu (observed concentration at specific time)
∇	= nabla, diferensial pada tiga arah sumbu $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$
A	= luas penampang permukaan
ABL	= <i>Atmospheric Boundary layer</i>
AM	= <i>air mass</i> , jumlah massa atmosfer yang dilintasi spektrum radiasi matahari (sebanding dengan ketebalan atmosfer yang dilintasi sesuai dengan sudut zenith)
AQMS	= <i>air quality management system</i>
aW	= massa uap air (<i>water vapor mass</i>)
BMKG	= Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
C_A	= konsentrasi spesies A
CAI	= Clean Air Initiative for Asian Cities
Calpuff	= calculation of puff and air quality dispersion model
Calmet	= calculation and diagnostic meteorological model
CBL	= canopy boundary layer
dm/d	= perbandingan estimasi jarak bumi dari matahari terhadap 1 satuan astronomi
EPA	= Environmental Protection Agency, US-EPA, badan perlindungan lingkungan Amerika Serikat
fk	= faktor kalibrasi model dihasilkan dengan model Gauss
GRAD	= intensitas global radiation, radiasi matahari yang terukur di permukaan bumi (watt/m ²)
h	= sudut jam matahari (<i>sun's hourly angle</i>)
$h\nu$	= energi foton (sebanding dengan frekuensi elektromagnetik (ν) dan konstanta Planck (h)), dalam studi ini berbanding lurus dengan influks radiasi matahari
I, R	= intensitas radiasi

IBL	= internal boundary layer
ISPU	= Indeks Standar Pencemaran Udara
k	= konstanta umum
L	= apanjang Monin-Obukhov
L	= skala panjang Monin-Obukhov, m
M ₁₀	= particulate matter 10, partikel atau debu di atmosfer yang tertangkap dalam filter 10 mikron
M _a	= massa molekul rata-rata atmosfer (29 g/mol)
MH, h	= <i>mixing height</i>
n	= hari ke-n dalam setahun; suku ke-n; orde ke-n; dan
N	= frekuensi Brunt-Väisälä.
n/N	= tutupan awan di atmosfer (<i>cloud covering</i>)
NO	= molekul nitrogen oksida radikal (<i>radical of nitric oxide</i>)
NO ₂	= molekul gas nitrogen dioksida
O	= atom oksigen radikal
O ₂	= molekul gas oksigen
O ₃	= molekul gas ozon
obs _i	= data observasi atau pengamatan
P	= tekanan udara (atm, torr)
PBL	= <i>Planetary Boundary Layer</i>
Q	= beban emisi dari sumber (g.s ⁻¹)
RBL	= rural boundary layer
S	= standar intensitas radiasi global, 1367 W/m ²
S ₀	= intensitas radiasi extraterrestrial
SO ₂	= molekul gas sulfur dioksida
S _s	= intensitas radiasi terkoreksi
SUF	= kode stasium monitoring meteorologi lokal dan pencemar udara ambien kota Surabaya
T	= temperatur atau suhu (°C, K)
t	= dimensi waktu, s
TA	= transmitansi molekul-molekul aerosol (<i>aerosol transmittances</i>)
th	= durasi siang, dihitung dari waktu terbitnya matahari
TM	= transmitansi molekul-molekul bukan air di atmosfer (<i>non-water molecule transmittances</i>)
tsg	= panjang waktu siang hari (jam), dihitung dari waktu terbit sampai terbenamnya matahari
ttb	= waktu terbit matahari
ttg	= waktu terbenam matahari
u*, w*	= kecepatan friksi atau angin permukaan arah x, arah y
u, v, w	= komponen vektor angin pada 3 dimensi ruang (x, y, z),
UBL	= <i>Urban Boundary Layer</i>
UCL	= <i>Urban Canopy Layer</i>
UUD	= undang-undang dasar Negara Republik Indonesia tahun 1945
V	= volume (L)
x, y, z	= dimensi ruang, sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z, menyatakan titik posisi pada garis ruang
z	= ketinggian (altitude) yang diamati dalam m, elevasi
z ₀	= panjang kekasaran (roughness), m

- γ = gradien temperatur potensial diatas ABL
 δ = declination angle
 θ = potensial temperatur (K),
 λ = latitude
 λ = konstanta kinetika umum
 f = konstanta gaya coriolis
 g = konstanta gravitasi (9,81 m/s²)
 $\chi(C)$ = fungsi penyelesaian umum konsentrasi atau perubahan konsentrasi
 $\partial\psi/\partial x$ = deferensial perubahan fluks terhadap perubahan posisi (x), gradien fluks/konsentrasi

---o0o---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Setiap warga negara Indonesia secara konstitusi berhak untuk mendapatkan lingkungan hidup yang baik dan sehat. Hal ini diatur dalam UUD 1945 pasal 28H ayat 1 (perubahan kedua). Hak-hak tersebut hingga kini belum terpenuhi secara menyeluruh dan terus menerus sepanjang tahun meskipun pemerintah telah melakukan berbagai upaya pengelolaan lingkungan. Sebagai contoh, terutama di kota-kota besar di Indonesia, sering terjadi kasus udara ambient tercemar dalam beberapa jam atau hari melebihi baku mutu. Hal ini menunjukkan pengelolaan lingkungan belum seimbang dengan penyebab turunnya kualitas lingkungan. Penyebab tersebut antara lain pertumbuhan ekonomi, transportasi, jumlah penduduk, permukiman padat, perubahan meteorologi, dan sebagainya.

Hasil pemantauan AQMS (*Air Quality Monitoring System* dalam *Air Quality Management for Metropolitan Areas*) pada tahun 2008 di sepuluh ibu kota provinsi di Indonesia, menunjukkan kualitas udara pada kategori baik, sedang sampai tidak baik. Beberapa kota besar seperti Jakarta, Bandung, Medan, Pontianak, dan Surabaya tercatat pernah mengalami kualitas udara pada kategori tidak sehat masing-masing selama 18 hari, 1 hari, 9 hari, 6 hari, dan 8 hari (CAI-Asia, 2009). Demikian juga dengan data rekaman ISPU Kota Surabaya tahun 2001-2008 yang menunjukkan kondisi kualitas udara dominan sedang dan tidak sehat dengan fluktuatif. Setidaknya 2 sampai 11 hari per tahunnya, udara Surabaya dalam kondisi tidak sehat (BLH-Surabaya, 2008).

Dalam laporan CAI-Asia Center (2009), disebutkan parameter pencemar seperti partikulat (PM_{10}), nitrogen dioksida (NO_2), dan sulfur dioksida (SO_2) di beberapa kota besar di Indonesia telah melebihi standar kualitas udara ambien. Hal ini didasarkan pada analisis dan monitoring tahunan beberapa kota di Indonesia yang mengoperasikan AQMS. Demikian juga laporan evaluasi kualitas udara perkotaan oleh Kementerian Lingkungan Hidup RI (2012), yang menyatakan di beberapa kota telah terjadi peningkatan NO_2 pada udara ambiennya dari tahun 2011 hingga tahun 2012. Setidaknya terdapat 15 dari 22 kota yang disurvei menunjukkan

peningkatan NO₂ dengan signifikan pada rentang tahun tersebut. Data-data ini menunjukkan dengan jelas bahwa pada waktu tertentu kualitas atmosfer perkotaan berada dalam kondisi kualitas udara yang tidak baik.

Kualitas udara yang tidak baik ini disebabkan oleh beban pencemar yang masuk atmosfer melebihi kemampuan dispersi dan netralisasi alamiahnya. Beberapa kejadian yang mengindikasikan kondisi kualitas udara di tingkat sedang dan tidak sehat, menunjukkan berlebihnya beban pencemar yang masuk ke atmosfer. Kejadian ini dapat disebabkan oleh (1) jumlah pencemar yang terlalu banyak, karena emisi yang diijinkan terlalu besar atau sektor pengemisinya terlalu banyak; atau (2) kemampuan atmosfer mendispersi pencemar tidak sebanding dengan jumlah pencemar, mungkin karena laju konveksi terlalu kecil atau atmosfer sangat stabil. Dengan demikian pengelolaan udara yang lebih baik sangat diperlukan terutama dalam hal prediksi beban, pemantauan dispersi, dan langkah antisipasinya. Monitoring yang baik terhadap kualitas udara merupakan hal mutlak yang diperlukan untuk langkah pengelolaan tersebut.

Dalam kenyataan di lingkungan, secara teori dan visualisasi, distribusi pencemar tidak memungkinkan seragam dalam satu area. Titik-titik pengamatan atau penerima yang lebih dekat dengan sumber tunggal dalam arah dispersi merupakan titik dengan konsentrasi yang lebih besar. Sedangkan dispersi dari sumber majemuk, titik-titik pengamatan atau penerima yang terpengaruh oleh semua sumber juga merupakan titik dengan konsentrasi yang lebih besar. Persebaran sumber dan beban pencemar yang tidak seragam memerlukan banyak titik pemantau untuk menyatakan konsentrasi rata-rata pencemar di ambien dengan baik. Dalam kaidah pengelolaan pencemaran udara setidaknya diperlukan titik pemantauan kualitas udara 5 – 13 stasiun pemantau otomatis (kontinyu) atau 18 – 33 stasiun pemantau mekanikal terintegrasi untuk penduduk sebanyak 3,5 juta orang seperti Kota Surabaya (Proyek PCI, 1999). Menurut EPA, stasiun-stasiun tersebut juga harus ditempatkan mewakili area konsentrasi tinggi, penduduk padat, sekitar lokasi pencemar, proyeksi, area sesuai strategi pengendalian, dan seluruh wilayah pemantauan (Proyek PCI, 1999).

Kota Surabaya merupakan salah satu kota metropolitan di Indonesia yang menerapkan AQMS sejak tahun 2001, dengan dipasangnya 5 stasiun pemantau

kualitas udara. Perkembangannya, pada pertengahan 2013 ditambahkan 1 stasiun pemantau dan awal 2014 juga dioperasikan lagi 1 stasiun pemantau. Hingga saat ini setidaknya ada 7 stasiun pemantau yang ada di Kota Surabaya. Stasiun-stasiun pemantauan ini dinamakan SUF (SUF 1 sampai dengan SUF 7)

Beberapa kendala teknis dan operasional menyebabkan 5 atau 7 stasiun ini tidak bisa beroperasi dengan penuh. Berdasarkan rekap data ISPU dari BLH yang tahun 2015, tercatat dalam rentang tahun 2010 hingga 2014, dalam waktu pemantauan yang bersamaan hanya 2 atau 3 stasiun pemantau yang dapat menghasilkan data. Sehingga data yang dihasilkan tidak mencukupi untuk menggambarkan kualitas udara Surabaya sesuai kaidah yang disebutkan sebelumnya. Dampak dari ketidakcukupan data tersebut adalah informasi yang tidak akurat bagi masyarakat secara umum dan pengambilan kebijakan pengelolaan lingkungan.

Untuk memperbaiki ketersediaan informasi data kualitas udara yang lebih komprehensif, lebih mudah secara teknis dan operasional, maka diperlukan langkah alternatif penyediaan data yang baik. Langkah ini setidaknya mampu memetakan persebaran pencemar udara dengan lebih baik dari sistem monitoring yang ada saat ini. Beberapa langkah alternatif dapat dilakukan antara lain, 1) mengoperasikan semua stasiun pemantau, 2) menambah stasiun pemantau hingga 10 atau 13 titik dan mendistribusi sesuai kriteria, atau 3) membangun model dispersi udara perkotaan yang diverifikasi secara ilmiah dan hasil pemantauan. Alternatif 1 dan 2 secara teknis dan operasional akan lebih berat dari kondisi di Surabaya saat ini. Alternatif 3 memberikan kemungkinan operasional yang lebih ringan dan murah jika model dispersi yang dimaksud tersedia. Alternatif 3 ini merupakan pilihan yang rasional untuk keperluan pengelolaan kualitas udara perkotaan.

Model-model dispersi untuk sumber tunggal telah banyak dikembangkan dengan karakteristik dan pendekatan yang spesifik. Beberapa model tersebut adalah dispersi Gauss, Model Box, Road Dispersion, Calmet/Callpuff, dan sebagainya. Namun secara prinsip model-model tersebut secara matematis digunakan untuk mengestimasi sumber-sumber secara individual atau kombinasi beberapa sumber saja. Model-model untuk perkotaan lebih banyak model deskripsi atau berdasarkan data pengukuran (dengan konstanta-konstanta empiris untuk stabilitas). Model

matematis yang menggabungkan semua sumber pada area perkotaan tertentu perlu dikembangkan, terutama berdasarkan karakteristik wilayah yang dimodelkan. Karakteristik tersebut antara lain didasarkan pada kekhasan meteorologi kota dengan kinetika reaksi pencemarnya. Model ini diharapkan dapat menjadi alternatif sumber data dalam pengelolaan kualitas udara perkotaan.

Pendekatan matematis untuk mengestimasi stabilitas atmosfer, volume tersedia, dan distribusi pencemar perlu dilakukan dalam membangun model yang dimaksud. Beberapa hasil penelitian terdahulu dijadikan rujukan dalam pendekatan ini. Salah satunya adalah kestabilan atmosfer yang dimodelkan Pasquill tahun 1972. Kestabilan atmosfer dalam model ini lebih menjelaskan kondisi atmosfer rata-rata dalam *Planetary Boundary Layer* (PBL) pada wilayah tertentu. Pada kenyataannya secara spesifik seperti di perkotaan, kondisi atmosfer juga dipengaruhi oleh *Urban Boundary Layer* (UBL), lebih kompleks dan detail dari PBL rata-rata. Dengan demikian pendekatan menggunakan model Pasquill memerlukan banyak koreksi jika diterapkan untuk menggambarkan kualitas udara perkotaan yang sangat dinamis dengan lebih detail. Bukan hanya kecepatan dan arah angin saja, tetapi lapisan-lapisan yang terjadi di atmosfer khususnya ketinggian lapisan pencampuran sangat berpengaruh dalam proses-proses emisi pada level *ground* (Schafer, et al., 2012). Tinggi PBL atau UBL ini merupakan parameter kritis dalam evaluasi pencemaran di atmosfer (Du, 2013).

Beberapa formula diagnosis ketinggian lapisan pencampuran (*mixing height*) telah diusulkan (Dierdorff, 1972; Zilitinkevich, 1972; Arya, 1981; Mahrt, dkk., 1982; Nieuwstadt, 1984; Benkley dan Schulman, 1979) dinyatakan dalam parameter berpengaruh antara lain kecepatan angin (pada 10 m di atas permukaan tanah), parameter Coriolis, *roughness* permukaan, dan koefisien panjang *Monin-Obukhov*. Rata-rata *mixing height* yang dihasilkan 364,7 m dengan deviasi 130,5 m. Formula-formula diagnosis yang diusulkan ini tidak memberikan nilai yang dekat dengan data-data pengukuran, sehingga tidak cukup baik dijadikan sumber data yang dibutuhkan untuk perhitungan dispersi (Burzynski, dkk., 2011). Namun formula-formula tersebut sangat penting dalam memberikan dasar-dasar pendekatan memprediksi *mixing height*.

Di sisi lain, sistem permodelan skala perkotaan harus mampu untuk menjelaskan pengaruh skala lokal yang bervariasi, fenomena mengembang dan menurunnya *plume* pencemar, termasuk transformasi kimia dan deposisi (Kukkonen, dkk., 1997). Transformasi kimia merupakan faktor yang sangat penting dalam memprediksi distribusi pencemar terutama pencemar yang reaktif secara fotokimia (*non conservative*). Beberapa pencemar dapat mengalami reaksi sekunder di atmosfer sehingga dapat bertambah data berkurang selama dalam perpindahannya.

Beberapa model deskriptif-prediktif telah dihasilkan dan dibandingkan terhadap data lapangan dengan hasil yang cukup baik. Contohnya adalah perbandingan data dispersi SO₂ yang dihasilkan model prediksi CALMET dan CALPUFF dengan data *urban air monitoring networking* di kota Izmir, Turkey memberikan akurasi sekitar 68 % (Elbir, 2003). Di waktu yang lain Fisher, dkk. (2006), menjelaskan dalam keluaran program model estimasi COST 715, bahwa konsep deskriptif sangat membantu untuk memahami struktur lapisan batas perkotaan (*urban boundary layer*) yang kompleks, walaupun hanya diaplikasi pada beberapa kondisi yang terbatas untuk model polusi udara. Satu contoh dari COST 715, bahwa pengukuran kecepatan angin rutin pada meteorologi perkotaan, dapat digunakan dan diadaptasi untuk penilaian kualitas udara. Kesimpulan ini berdasarkan review terpilih dari program COST 715 yang dijalankan 1998-2004 (Fisher, dkk., 2006).

Model berikutnya merupakan formula aljabar sederhana untuk menyatakan parameter-parameter dispersi, σ_z^2/z_i^2 , menggunakan skala waktu de Korelasi dari karakteristik lahan turbulen dalam lapisan pembatas konvektif (*convective boundary layer*) (Buligon, dkk., 2008). Formula aljabar sederhana ini lebih mudah dalam operasionalnya dibandingkan dengan formula integrasi klasik sebelumnya (dibahas pada sub bab 2.4). Namun demikian model ini tidak menjelaskan aplikasi untuk sumber majemuk dan zat pencemar yang tidak konservatif serta tidak menjelaskan pengaruh *terrain* permukaan atau topografi di bawahnya.

Secara ringkas, suatu permodelan kondisi dispersi pencemar daerah perkotaan membutuhkan profil angin, turbulensi, fluks panas permukaan (topografi

dan koefisien terbangun), dan tinggi percampuran untuk menjalankan model transport polusi kualitas udara, termasuk model dispersi sederhana dan yang lebih kompleks, serta model-model simulasi numerik (Middleton, 2002). Dengan demikian, kota-kota yang mempunyai data-data tersebut dapat membuat model dispersi sesuai dengan karakteristiknya.

Kota Surabaya merupakan kota yang memiliki data-data meteorologi yang cukup lengkap karena adanya stasiun BMKG (Tanjung Perak dan Juanda) dan stasiun pemantauan kualitas udara serta iklim lokal (SUF). Kota ini memiliki rekaman data meteorologi yang dapat digunakan untuk membuat model distribusi pencemar dan melakukan verifikasi. Model tersebut diharapkan dapat mengestimasi stabilitas atmosfer (*mixing height* atau UCL (*urban canopy layer*) atau UBL), menentukan konstanta stabilitas atmosfer, membuat *forecasting*, dan sebagainya. Adanya rekaman data ambien (SUF), dapat dijadikan modal yang baik untuk melakukan verifikasi model distribusi yang dihasilkan.

Hasil verifikasi akan menentukan tingkat kepercayaan estimasi model ini dalam menggambarkan distribusi pencemar di perkotaan (perubahan kualitas udara ambien). Estimasi model juga dapat digunakan dalam analisis kondisi-kondisi kritis stabilitas atmosfer dan membuat peta sebaran pencemar di semua wilayah. Dalam prinsip dispersi, kondisi kritis tersebut merupakan kondisi minimal dalam pengenceran/pendistribusian pencemar. Kondisi ini yang mestinya digunakan sebagai acuan untuk menentukan kebijakan pengelolaan pencemaran. Secara umum kualitas udara yang cukup baik pada kondisi kritis dapat dijadikan jaminan kualitas yang baik pada kondisi lain.

Berdasarkan ketersediaan hal-hal tersebut di atas, maka dalam penelitian ini disusun model diagnostik matematik yang representatif, untuk memprediksi distribusi pencemar dari berbagai sumber yang dipengaruhi oleh parameter meteorologi dan stabilitas atmosfer. Model ini diharapkan dapat memberikan estimasi data yang baik dan peta persebaran pencemar, memperhitungkan status beban pencemar dan akumulasinya di atmosfer. Lebih lanjut, dengan mengkombinasikan baku mutu kualitas udara, maka dapat digunakan sebagai bahan evaluasi kinerja dan kesesuaian pola pemantauan kualitas udara saat ini. Model yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat digunakan pemerintah sebagai acuan

membuat regulasi terhadap sumber-sumber emisi dan pengelolaan kualitas udara secara umum.

1.2. Perumusan Masalah

Untuk mendapatkan model diagnostik matematik yang representatif khas perkotaan, dan untuk memprediksi distribusi pencemar dari berbagai sumber yang dipengaruhi meteorologi dan stabilitas atmosfer maka dirumuskan beberapa permasalahan yang dikaji penyelesaiannya dalam riset disertasi ini antara lain:

- a. Bagaimana kinetika transport dan kinetika reaksi di atmosfer dan seberapa besar kontribusi pada kualitas udara ambien.
- b. Bagaimana mengestimasi kestabilan atmosfer, tinggi pencampuran (*mixing height*) sebagai dasar penentuan volume distribusi pencemar udara.
- c. Bagaimana memodelkan persebaran pencemar di Kota Surabaya dengan model modifikasi persamaan dispersi dan transport pencemar berdasarkan atas kinetika transport dan kinetika reaksi di berbagai kondisi kestabilan atmosfer.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Didapatkannya model estimasi kestabilan atmosfer perkotaan dan perubahan tinggi pencampuran dalam siklus radiasi harian.
- b. Diperolehnya konsep penentuan konstanta yang merepresentasikan kinetika transport dan kinetika reaksi di atmosfer dan kontribusinya pada kualitas udara ambien.
- c. Didapatkannya model distribusi pencemar di perkotaan dengan model pengembangan persamaan dispersi didasarkan atas kesetimbangan massa-energi, kinetika transport dan kinetika reaksi.

1.4. Ruang Lingkup dan Asumsi Penelitian

1.4.1. Ruang Lingkup Penelitian

- a. Model dispersi dikembangkan dengan pendekatan sifat material yang terlarut sempurna dalam fluida dan tidak terdiskrit secara nyata. Hasil pendekatan model ini hanya berlaku pada pencemar berbentuk gas, tidak berlaku pada pencemar berbentuk partikulat.
- b. Model dispersi pencemar yang dibuat adalah model dalam skala perkotaan dengan topografi yang relatif datar atau diasumsikan datar dengan ketinggian dianggap seragam.
- c. Model yang dibuat adalah model matematik yang berlaku untuk gas pencemar konservatif dan non-konservatif dengan kinetika reaksi. Model tersebut diverifikasi dengan model-model lain yang telah dipublikasi untuk kondisi atmosfer tidak stabil dan data sekunder lapangan yang dimiliki oleh Kota Surabaya.
- d. Data-data sekunder yang digunakan untuk melakukan verifikasi dan validasi model adalah data-data dari pemantauan AQMS (ISPU) Kota Surabaya, data transportasi dan pemantauan industri, dan data permukiman dari penelitian terdahulu. Semua data merupakan data yang dipublikasikan dalam 5 – 10 tahun terakhir.
- e. Data-data beban emisi domestik pada wilayah-wilayah kajian, yang tidak tersedia, akan didekati dengan perhitungan teoritis sesuai acuan-acuan faktor emisi domestik atau dengan analog terhadap data wilayah lain yang mirip.

1.4.2. Asumsi Penelitian

Perubahan kuantitas kegiatan domestik dan transportasi diasumsikan mengikuti pola siklus yang normal selama kurun waktu kajian. Perubahan kestabilan atmosfer terjadi alamiah dan tidak ada kejadian-kejadian luar biasa di atmosfer yang menyebabkan perubahan meteorologi lokal secara drastis.

1.5. Kontribusi Penelitian

Hasil disertasi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif dalam pengelolaan kualitas udara dan pertimbangan keilmuan. Model dispersi dan kinetika reaksi pencemar di atmosfer dari disertasi ini juga dapat digunakan sebagai alternatif penyediaan data kualitas udara, pemetaan, dan analisis dalam pengelolaan udara.

Bagi pemerintah, hasil disertasi ini diharapkan dapat digunakan sebagai salah satu rujukan untuk menentukan status kualitas udara perkotaan, pertimbangan dalam menentukan alternatif regulasi yang terukur, dan membuat dasar pemberian ijin emisi gas buang. Penelitian ini juga dapat dijadikan bahan masukan untuk menentukan kuantitas parameter-parameter pencemar ambien dalam kebijakan pengelolaan udara perkotaan.

Secara akademik disertasi ini menghasilkan pendekatan baru pada formulasi kinetika fotoreaksi dan model dispersi pencemar udara di atmosfer perkotaan. Hasil pendekatan formulasi kinetika adalah model kinetika yang melibatkan GRAD dan NO_2 terukur sebagai unsur dalam fotoreaksi. Data NO_2 terukur merupakan sisa reaksi pada setiap waktu. Secara umum pendekatan kinetika selalu menggunakan reaktan awal dan GRAD sebagai pengondisi reaksi. Pada penelitian ini analisis korelasi matematik digunakan untuk mendapatkan hubungan antara reaktan awal dengan sisa reaksi dalam mekanisme fotoreaksi kimia. Hasil analisis tersebut digunakan untuk menyusun formulasi kinetika. Formulasi ini merupakan pendekatan baru pada aplikasi model kinetika bagi lingkungan.

Hasil pendekatan model dispersi pencemar dalam penelitian ini adalah formula yang bersifat lebih umum (*general*) dibandingkan dengan model dispersi Gauss. Dalam aplikasinya, formula yang dihasilkan terintegrasi dengan estimasi *mixing height* (dipengaruhi radiasi, GRAD) dan kestabilan atmosfer, sensitif terhadap jarak dispersi dan kecepatan alir fluida (angin). Formula ini lebih sederhana dibandingkan dengan model Gauss yang menggunakan kestabilan Pasquill yang harus diestimasi terpisah.

Hasil dari penelitian ini juga diharapkan dapat dikontribusikan sebagai *tool* bagi dunia akademik sebagai alternatif untuk mempelajari sifat distribusi pencemar,

pemetaan status kualitas udara, penentuan/evaluasi baku mutu udara, dan sebagainya. dan pengembangan model transport pencemar di lingkungan.

---o0o---

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Radiasi Matahari dan Pemanasan Atmosfer

Radiasi matahari adalah intensitas energi yang dipancarkan matahari secara terus menerus dan diterima permukaan bumi. Karena rotasi dan revolusi bumi, maka intensitas radiasi (irradiasi) yang diterima setiap titik di permukaan bumi dapat bervariasi. Rotasi dan revolusi bumi ini menyebabkan perubahan jarak aktual matahari ke bumi dan perubahan sudut zenith matahari ke setiap titik di bumi. Sudut zenith adalah sudut simpangan yang diacu dari posisi matahari tegak lurus ke permukaan bumi. Irradiasi matahari pada permukaan atmosfer dipengaruhi oleh kedua faktor tersebut dan dinyatakan:

$$I = S \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \cos \theta_0 \quad (2.1)$$

Dimana S adalah konstanta intensitas matahari, d_m/d adalah rasio jarak aktual dengan jarak rata-rata matahari ke bumi. Sudut zenith matahari tergantung pada *latitude*, hari dalam setahun, dan waktu dalam sehari, dan dinyatakan dalam:

$$\cos \theta_0 = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos h \quad (2.2)$$

Dimana λ adalah *latitude*, δ deklinasi matahari, dan h adalah sudut jam. Sudut jam adalah nol pada terbit matahari dan bertambah 15° setiap jam. Sudut zenith matahari adalah 90° pada saat tenggelam dan terbit. Dalam rata-rata data astronomi diketahui deklinasi matahari berada diantara $23^\circ 27'$ (21 Juni) sampai $-23^\circ 27'$ (22 Desember). Nilai $(d_m/d)^2$ berada dalam rentang 1,0343 (3 Januari) sampai 0,9674 (5 Juli).

Radiasi pada permukaan horisontal merupakan *possible* radiasi (S_0) yang dapat masuk ke permukaan bumi, dinyatakan:

$$S_0 = S \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos h) \quad (2.3)$$

Dengan n adalah hari dari setahun. Sedangkan radiasi ekstraterestial harian terintegrasi (dari terbit hingga tenggelam) yang diterima permukaan datar adalah:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 S}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) x \left(\cos \lambda \cos \delta \cos h + \frac{\pi h}{180} \sin \lambda \sin \delta \right) \quad (2.4)$$

Dengan S dalam watt/m² dan H_0 dalam Joule/m².

Massa udara (*air mass*) adalah panjang lintasan radiasi matahari menembus atmosfer bumi dalam unit AM. Nilai AM ini akan semakin besar dengan bertambahnya sudut dari zenith. Estimasi AM secara sederhana menggunakan persamaan:

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (2.5)$$

$s = shadow$ dan $h =$ tinggi struktur vertikal

2.2. Planetary Boundary Layer dan Mixing Height

Dalam banyak kepentingan studi berkaitan dengan fenomena pencemaran udara, troposfer dibagi dalam dua lapisan, lapisan batas planetari (*planetary boundary layer*) dan lapisan troposfer bebas (*free troposphere*). Lapisan batas planetari membentang dari permukaan bumi sampai sekitar 1-2 km, dan troposfer bebas berada di atasnya. Secara umum lapisan dekat permukaan dimana panas, momentum, dan kelembaban selalu bertukar antara bumi dan atmosfer dinamakan *atmospheric boundary layer* (ABL). Sifat turbulen lapisan ini (difusifitas, pencampuran, perpindahan) menentukan dispersi pencemar dan pengencerannya. Ketinggian ABL atau sering juga disebut *planetary boundary layer* sangat menentukan volume yang tersedia bagi pencemar untuk terdispersi dan tergantung pada parameter meteorologi dasar, fluks turbulen permukaan, dan parameter fisiografi (Piringer, dkk., 2011).

Pergerakan udara vertikal di atmosfer bagian bawah merupakan akibat dari (Seinfeld dan Pandis, 2006):

1. konveksi dari pemanasan energi matahari pada permukaan bumi
2. aliran konvergen atau divergen horisontal
3. aliran horisontal melewati ronan topografi pada permukaan bumi
4. pelayangan atau pengapungan (*bouyancy*) disebabkan oleh pelepasan panas laten ketika air terkondensasi.

Suatu *planetary boundary layer* (PBL) atau *mixing height* (MH) merupakan parameter kunci model pencemaran udara dalam penentuan volume tersedia untuk ruang dispersi pencemar di atmosfer (Siebert, dkk., 2000) dan merupakan struktur turbulensi dalam lapisan batas (Hashmonay, dkk., 1991). Lapisan-lapisan yang terjadi di troposfer khususnya ketinggian lapisan pencampuran sangat berpengaruh dalam proses-proses emisi pada level *ground* (Schafer, dkk., 2012). Tinggi PBL atau UBL ini merupakan parameter kritis dalam evaluasi pencemaran di atmosfer (Du, dkk., 2013).

Namun demikian hingga saat ini belum banyak metode langsung yang tersedia untuk menentukan suatu MH. Metode yang paling populer untuk penentuan MH tersebut adalah penggunaan *radiosounding* (suatu metode sistem *sounding remote*) dan pemarameterisasian. Sehingga sangat relevan untuk mengembangkan dan mengevaluasi teknik atau metode baru yang mempunyai ketidakpastian lebih kecil dalam memodelkan PBL atau MH (Eresmaa, dkk., 2006).

2.3. Metode-metode Referensi menentukan MH

Sifat *mixing height* selalu berubah dan ketinggiannya sangat sensitif terhadap perubahan kondisi atmosfer dan dinamika permukaan di bawahnya. Dengan demikian *mixing height* tidak dapat secara langsung diamati dengan pengukuran-pengukuran standar, sehingga keberadaannya harus diparameterisasikan atau secara tidak langsung diestimasi dari pengukuran profil-profil lain atau simulasi model (Piringer, dkk., 2011). Beberapa metode telah dikembangkan untuk estimasi suatu *mixing height*, antara lain:

2.3.1. Metode Estimasi MH Berdasar Pengukuran Tidak Langsung

2.3.1.1. Ceilometer

Metode ini dioperasikan menggunakan Vaisala ceilometer lensa tunggal yang mengukur intensitas laser dengan panjang gelombang 905 nm (dekat dengan inframerah) yang dihamburkan balik oleh udara. Intensitas hamburan balik ini secara dominan tergantung pada konsentrasi partikulat di udara. Ukuran partikulat dapat bervariasi dengan kelembaban, sehingga hamburan ini juga sangat dipengaruhi oleh kelembaban atmosfer. Disisi lain keberadaan awan, *fog*/kabut, dan

hujan mengganggu pengukuran. Metode ini ini mencukupi untuk menganalisis struktur *boundary-layer* (Eresmaa, dkk., 2006).

2.3.1.2. Radiosonde

Penentuan tinggi mixing layer dari sudut pandang termodinamikan seperti pengamatan profil perubahan temperatur dan kelembaban. Profil kedua parameter ini salah satunya dibaca dengan *radiosonde* (dengan menangkap hamburan gelombang pantul dari gelombang radio yang dipancarkan ke atmosfer). Kerugian dari metode ini, bahwa metode ini hanya dioperasikan rutin pada waktu sinoptik yang pasti dengan maksimum dua atau empat jam perhari. Dengan demikian tidak bisa digunakan untuk pemantauan secara terus menerus.

Prinsip pemantauan menggunakan radiosonde ini dijelaskan dengan metode bulki Richardson. Bilangan Richardson menjadi skala parameter yang mengindikasikan rasio turbulensi termal dan mekanikal. Keduanya merupakan karakteristik sifat untuk *mixing layer* dan atmosfer bebas di atasnya.

Persamaan umum Richardson yang digunakan dalam penjelasan radiosonde ini adalah:

$$R_{ib}(z) = g \frac{(z-z_0)[\theta(z)-\theta(z_0)]}{\theta(z)(u(z)^2+v(z)^2)} \quad (2.6)$$

dengan:

g = konstanta gravitasi (9,81 m/s²),

z = ketinggian (*altitude*) yang diamati dalam m,

θ = potensial temperatur (K),

u dan v = komponen vektor angin zonal dan meridial, dan

$R_{ib}(z)$ = bilangan bulki Richardson pada z .

2.3.2. Metode Diagnostik untuk Menentukan MH dalam Situasi Stabil

Dalam kondisi stabil, *mixing height* (MH) diidentifikasi sebagai ketinggian inversi atau lapisan stabil menggunakan metode *parcel gas* oleh Holzworth tahun 1967 atau *parcel* lanjutan oleh Stull tahun 1988 (Du, dkk., 2013). Peneliti lain mengidentifikasi MH sebagai ketinggian saat terjadi penurunan yang nyata terhadap kelembaban atau metode *humidity-jump* (Lyra, dkk., 1992). Disisi lain,

MH juga diidentifikasi dengan perubahan profil temperatur (Metoda Heffter) yang diikuti metode *parcel*.

Rata-rata MH yang diperoleh dari metode *humidity-jump* memberikan perbandingan yang baik dengan metode metode berbasis temperatur pada musim panas, tetapi memberikan hasil yang lebih besar pada musim dingin. Inversi penutup sangat berhubungan dengan penurunan kelembaban udara pada musim panas, sedang pada musim dingin penurunan yang jelas terhadap kelembaban terdapat pada elevasi lebih tinggi dari inversi penutup (Baklanov, dkk., 2006).

Sifat-sifat umum ABL dan MH utamanya diteorikan melalui hubungannya terhadap skala kecepatan friksi atau angin permukaan (u^*), atau kecepatan konvektif (w^*), skala temperatur (T^*), tiga skala panjang (panjang Monin-Obukhov (L), ketinggian (elevasi, z), dan tinggi ABL), dan dipengaruhi parameter eksternal yaitu kecepatan angin lapisan bagian atas (kecepatan angin geostropik), paramater Coriolis karena rotasi bumi, dan kekasaran permukaan bumi (Baklanov, dkk., 2006). Kekasaran (*roughness*), digambarkan dengan panjang kekasaran (z_0), suatu ukuran ketinggian jenis ketidakaturan permukaan, dan frekuensi Brunt-Väisälä ($N \rightarrow N^2 = \beta \gamma$, dimana γ adalah gradien temperatur potensial diatas ABL).

Pada kondisi tunak homogen, struktur ABL dan keragamannya dinyatakan sebagai kombinasi perbandingan tanpa dimensi dari skala-skala di atas. Dalam kondisi stabil ABL dan MH ditentukan menggunakan setidaknya dengan tiga metode diagnostik yang berbeda, yaitu:

1. Menggunakan model heuristik yang diturunkan Joffre dan Kangas, 2001, dimana

$$h = C_{st} L_N^{3/4} L^{1/4} \quad (2.7)$$

Pada persamaan tersebut $C_{st} = 7,71$ merupakan konstanta empiris, L adalah panjang Monin-Obukhov dan $L_N = u^*/N$, u^* = kecepatan friksi dan N merupakan frekuensi Brunt-Väisälä.

2. Menggunakan formula netral klasik termasuk kecepatan friksi (u^*) dan parameter coriolis (f) yang diusulkan pertama kali oleh Rossby dan Montgomery pada tahun 1935 (Eresmaa, dkk., 2006), dimana:

$$h = a \frac{u^*}{f} \quad (2.8)$$

dengan diusulkan nilai empiris untuk konstanta a merupakan sebaran dalam kisaran 0,05 – 0,3. Biasanya digunakan nilai 0,14 didasarkan pada data-data *sodar* (Arya, 1981).

Pada perkembangannya banyak usulan-usulan persamaan algoritma untuk menentukan MH ini. Beberapa diantaranya adalah persamaan estimasi MH bagian atas atmosfer pada kondisi stabil PBL dan MH diestimasi menggunakan skala cuaca, iklim, dan model kualitas udara, dipengaruhi oleh pencampuran turbulen, difusi vertikal, perpindahan konvektif, awan atau aerosol *entrainment*, deposisi pencemar di atmosfer (Khandokar, dkk., 2010).

Tabel 2.1 Persamaan Algoritma Diagnostik untuk Mengestimasi MH

Referensi	Persamaan MH	Nilai rata-rata (m)	Deviasi Standar (m)
(Arya 1981) setelah (Zilitinkevich 1972)	$h = a \left(\frac{u_* L}{f} \right)^{1/2} + b$ $a = 0,43; b = 29,3$	150,7	130
(Zilitinkevich 1972)	$h = c_2 \left(\frac{u_* L}{f} \right)^{1/2}$ $c_2 = 0,4(0,13 + 0,72)$	115,6	130,6
(Arya 1981)	$h = 0,089 \frac{u_*}{f} + 85,1$	179	62,5
(Mahrt, Andre dan Heald 1982)	$h = 0,06 \frac{u_*}{f}$	63,4	42
(Nieuwstadt 1984)	$h = 28u_{10}^{3/2}$	60,3	35
(Benkley & Schulman, 1979)	$h = 125u_{10}$	200,8	78,4
H van Dop	$h = 0,263L \left[\left(1 + \left(2,28 \frac{u_*}{fL} \right) \right)^{1/2} - 1 \right]$	65,6	76,5
Dierdorff, 1972	$h = \left[\frac{1}{30L} + \frac{f}{0,4u_*} \right]^{-1}$	262,5	194,5

Keterangan: h = *mixing height*, u = kecepatan angin pada 10 m, f = parameter coriolis, u^* = kecepatan angin permukaan, L = Panjang Monin Obukhov. Sementara rata-rata nilai MH data sodar adalah 364,7 m dengan deviasi standar 137,5 m.

3. Pendekatan klasik untuk ketinggian lapisan stabil Ekman (Zilitinkevich, 1972), dimana:

$$h = B_s \sqrt{\frac{u^*}{f}} \quad (2.9)$$

dalam hal ini $B_s = 2$ sesuai dengan estimasi Zilitinkevich. Beberapa pendekatan lain penentuan MH dapat dilihat pada Tabel 2.1.

2.4. Dasar Dinamika Atmosfer

Beberapa dasar penting dalam memperhitungkan meteorologi lapangan, ABL, dan atmosfer bebas terangkum dalam dinamika atmosfer. Dinamika ini berkaitan dengan mekanika fluida yang dipengaruhi oleh proses-proses di atmosfer tergantung *altitude*-nya, antara lain (Sportisse 2008):

1. Dalam troposfer bebas, terdapat kesetimbangan antara gaya gradien-tekanan dan gaya Coriolis, yang dijelaskan dengan angin geostropik. Angin berbelok mengikuti rotasi bumi. Pada wilayah yang sempit, pembelokan angin ini dapat diabaikan (gaya coriolis dianggap seragam).
2. Dalam ABL, pengaruh permukaan menentukan mekanika aliran fluida dan simplifikasi persamaan mekanika fluida ini dapat menggunakan pendekatan Boussinesq.

Beberapa hal yang sangat penting dalam estimasi dinamika atmosfer adalah sebagai berikut:

Persamaan Navier-Stokes. Udara dapat digambarkan sebagai fluida, dan dinyatakan dengan beberapa parameter antara lain, kecepatan angin, densitas, energi atau temperatur, dan kelembaban. Jika diasumsikan udara merupakan gas ideal, tekanan dapat dihitung dari densitas dan temperatur. Dan evolusi atmosfer dapat dinyatakan dalam perubahan beberapa pernyataan atau parameter berikut (Sportisse 2008):

1. Konservasi Massa dan Momentum. Bahwa total massa dan total momentum dalam setiap perubahan akan tetap di awal dan di akhir. Pernyataan prinsip ini dapat ditulis ke dalam persamaan kontinuitas.

$$\partial\rho + \nabla\rho V = 0$$

2. Kesetimbangan energi. Menggunakan prinsip similaritas dengan konservasi massa, persamaan kontinuitas juga dapat diterapkan untuk temperatur (energi)

atau fluks panas. Fluks panas adalah fluks panas laten (transisi fasa air), fluks panas radiative, dan fluks difusi. Pernyataan kontinuitas untuk hal ini adalah:

$$\rho c_p DT = Q + \mu_0 \Delta T$$

dimana, μ_0 adalah konduktivitas termal, DT kontinuitas temperatur, dan Q adalah fluks panas (laten dan radiatif).

3. Kelembaban Spesifik. Persamaan kontinuitas untuk kelembaban adalah:

$$Dq_s = S_{q_s} + v_w \Delta q_s$$

dimana, v_w adalah koefisien difusi molekuler untuk uap air dan S_{q_s} adalah laju transisi fase air.

Aliran dalam ABL. Penggunaan persamaan pendekatan Boussinesq digunakan untuk menyederhanakan estimasi aliran dalam ABL. Pada pendekatan ini densitas udara diasumsikan tidak terlalu bervariasi sehingga dapat dilakukan pendekatan hidrostatis. Pada satu level ketinggian tertentu, densitas udara dianggap mendekati konstan. Perubahan densitas ini akan diperhitungkan ketika udara mengalami bouyancy karena perbedaan termal. Keadaan referensi untuk pendekatan Boussinesq adalah (Sportisse 2008):

- pada saat tunak (rest, $Vr = 0$)
- pada saat hidrostatis ($dP/dz = -\rho g$)
- pada saat adiabatik ($dT/dz = -g/c_p$)
- keadaan udara diasumsikan gas ideal ($PV = nRT$)

Surface Boundary Layer (SBL), didefinisikan sebagai lapisan dengan fluks konstan dalam rentang sedikit di atas permukaan bumi. Parameter ini sangat berhubungan dengan kecepatan friksi (angin) dan kekasaran permukaan (*roughness*). Pada kondisi netral, kecepatan friksi dapat dinyatakan dalam variabel u dan z , dimana

$$\frac{d(u)}{dz} = \frac{u_*}{\kappa z}$$

biasanya κ dinyatakan dengan nilai 0.35 sampai 0.4 (konstanta tidak berdimensi). Integrasi dari persamaan tersebut, diperoleh profil logaritmik kecepatan friksi, yaitu:

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$

dimana z_0 adalah ketinggian *roughness* asumsi dalam meter (Sportisse 2008). Nilai ketinggian *roughness* ini untuk beberapa keadaan adalah 0.1 mm, 1 cm, 10 cm, 1 m, dan 1-3 m untuk permukaan laut, rerumputan, pertanian, hutan, dan perkotaan (NIWAR - ME Manatu Mo Te Taiao, 2004).

2.5. Lapisan Batas *Planetary* dan *Mixing Height* Perkotaan

Secara prinsip ketika pencemar dari permukaan bumi dilepas ke atmosfer maka zat-zat pencemar tersebut akan didistribusi dalam volume terbatas sampai lapisan batas atmosfer yang paling dekat di atas sumber pencemar. Dalam kajian umum, jika pencemar dianggap berasal dari permukaan bumi, maka zat-zat pencemar ini akan didistribusi sampai lapisan batas yang dikenal dengan *planetary boundary layer* (PBL). Lapisan batas planetary atau PBL ini adalah bagian atmosfer terbawah yang dipengaruhi oleh permukaan bumi dan berhubungan dengan gaya-gaya permukaan (seperti gaya friksi), evaporasi-evapotranspirasi, transfer panas, emisi pencemar, dan topografi (Cooper dan Eichinger, 1994). Sedangkan di atas PBL, dikategorikan sebagai atmosfer bebas yang diasumsikan tidak dipengaruhi oleh gaya friksi dari permukaan bumi. Atmosfer bebas ini dapat diperlakukan dalam analisis sebagai sebuah fluida ideal (Glickman, 2000).

Dengan demikian PBL adalah lapisan dalam atmosfer bawah dimana terjadi interaksi langsung antara aliran atmosfer skala besar dengan permukaan bumi. Ketika zat pencemar diemisikan ke atmosfer, maka pada lapisan ini zat-zat pencemar tersebut akan didispersi secara *gradual* ke arah horisontal dan vertikal melalui mekanisme turbulensi. Proses ini akan menyebabkan pencampuran sempurna pencemar dengan atmosfer jika waktunya cukup dan tidak ada pengendapan (*sink*) atau sumber-sumber lain. Lapisan-lapisan ini disebut juga dengan lapisan pencampuran (*mixing layer*, ML) (Seibert, dkk., 1978). Dengan demikian ketebalan ML ini sangat menentukan volume yang tersedia untuk distribusi atau dispersi pencemar dalam atmosfer.

Burzynski, dkk. (2011), menurunkan algoritma *mixing height* didasarkan pada:

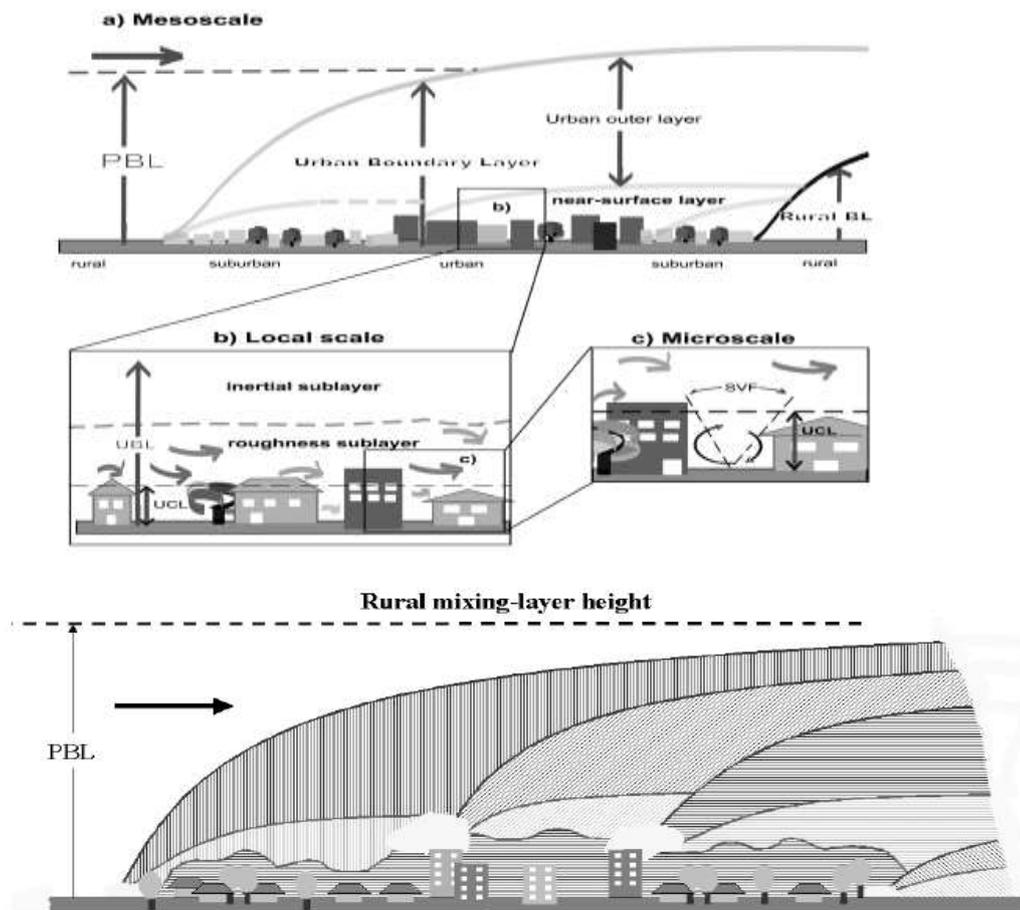
- a. Tinggi dari permukaan tanah (*ground*) terhadap lapisan inversi (jika ada), atau struktur *multi-layer* bagian atas dihubungkan dengan inversi dari *ground*.

- b. Tinggi inversi penutup, ketika kenaikan inversi menutupi *cell beneath* konvektif (evolusi lapisan batas konvektif saat pagi)
- c. Tinggi kisaran maksimum *plume* konvektif dikalikan faktor 1,5 pada kondisi CBL terbentuk sampai maksimum *layer* tercapai. Kemudian *mixing height* diturunkan dari sodar dengan nilai 80% dari maksimum terhadap waktu akhir setiap hari (ketika lapisan stabil terbentuk).

Suatu PBL yang khas di daerah perkotaan dinamakan *urban boundary layer* (UBL), sedangkan yang berada di daerah bebas dengan permukaan relatif homogen disebut *rural boundary layer* (RBL). Dibandingkan dengan RBL, suatu UBL mempunyai karakteristik lebih heterogen secara horisontal, kemampuan *mixing* lebih besar karena kekasaran permukaan yang lebih besar dan panas permukaan yang lebih besar. Dengan demikian suatu UBL dapat dijelaskan sebagai kasus khusus pada sebuah ABL yang berada di atas permukaan (*terrain*) non homogen (Baklanov dan Kuchin, 2004).

Beberapa aspek yang harus dipertimbangkan dalam menganalisis suatu UBL atau MH perkotaan adalah *internal boundary layer* (IBL) perkotaan, lapisan inversi nokturnal bagian atas, ketidakhomogenan horisontal yang kuat dan ketidakstasioneran *temporal*, *roughness* perkotaan, *urban canopy level*-nol dan perubahannya karena ketinggian, fluks panas antropogenik skala kota, *plume* pencemar mengikuti angin, kondisi iklim *calm*, dan pengaruh perubahan fluks uap air atau kelembaban.

Hal utama dalam pembahasan dan memodelkan UBL adalah kekompleksannya, sehingga tidak bisa diasumsikan bahwa atmosfer bersifat homogen. Lapisan-lapisan atmosfer perkotaan bagian bawah, berubah dengan rentang yang lebar sesuai dengan perubahan waktu dan skala ruang (Fisher, dkk., 2006). Gambaran proses, aliran, dan skala pada UBL, dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2.6 Diagram proses, aliran, dan skala yang ada dalam PBL dan UBL (Fisher, dkk., 2006)

2.6. Prinsip Dasar Distribusi Transfer Massa Pencemar di atmosfer

2.6.1. Difusi Transfer Massa Pencemar

Dalam banyak tujuan, transfer massa melalui difusi dapat dianalogkan dengan fenomena transfer panas melalui proses konduksi dan aliran fluida *laminar* (transfer momentum). Secara umum ketiga fenomena tersebut berpijak pada persamaan laju apa saja yaitu:

$$\text{laju} = \text{drivingforce}/\text{resistensi} \quad (2.10)$$

Sangat jelas bahwa jika gaya penggerak (*driving force*) makin besar, maka laju juga semakin besar, dan sebaliknya memperbesar resistansi akan menurunkan laju (Brodkey dan Hershey, 1988).

Jika diasumsikan luasan sebagai satu unit luas (A), maka resistansi akan sebanding dengan luas yang dilalui zat ketika berdispersi, analogi persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{q}{A} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{J}{A} = -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{T,P=\text{konstan}} \quad (2.12)$$

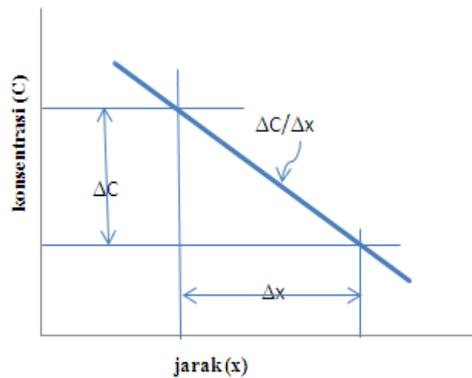
$$\frac{F}{A} = \tau_{yx} = -\mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (2.13)$$

Ketiga persamaan dasar analogi diatas, dikenal dengan persamaan konduksi Fourier (2.5), persamaan difusi Fick (2.6) dan persamaan viskositas Newton (2.7), disebut juga hubungan konstitutif. Persamaan-persamaan tersebut dapat dituliskan ke dalam persamaan umum fluks satu dimensi (Brodkey dan Hershey, 1988):

$$\Psi_x = -\delta \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \quad (2.14)$$

Dimana Ψ_x adalah fluks dalam arah x, δ adalah konstanta proporsionalitas (k, D, atau μ) dan $\partial \psi / \partial x$ merupakan gradien konsentrasi.

Dalam difusi atomik atau molekular, konduktifitas merujuk pada difusifitas atau suatu konstanta difusi, dan dinyatakan dengan simbol D. Sedangkan gaya penggerak (*driving force*) untuk berbagai proses difusi adalah manifestasi dari gradien konsentrasi. Gradien merupakan penjelasan dari variasi konsentrasi suatu parameter kajian sebagai fungsi jarak dalam arah sumbu-x, atau laju perubahan konsentrasi dengan perubahan jarak (dc/dx). Gradien ini juga dapat dinyatakan sebagai *slope* grafik konsentrasi terhadap posisi atau jarak (lihat Gambar 2.2).



Gambar 2.7 Gradien konsentrasi dalam perubahan posisi x

Jika fluks difusi melibatkan dua spesies, maka fluks molar absolut dan fluks massa absolut adalah perpindahan spesies A karena difusi dalam campuran biner spesies A dan spesies B, dibandingkan dengan referensi yang tetap. Jika diambil referensi adalah satu titik dalam sistem campuran, maka kecepatan relatif terhadap referensi untuk zat A adalah v_A , demikian juga kecepatan relatif terhadap referensi untuk zat B adalah v_B . Fluks molar absolut akan ekuivalen dengan konsentrasi zat dan kecepatan relatifnya terhadap referensi, sehingga:

1. Fluks absolut molar spesies A dan spesies B

$$N = C v^* = N_A'' + N_B''; \quad N_A'' = C_A v_A \text{ dan } N_B'' = C_B v_B \quad (2.15)$$

Dengan $J_A^* + C_A v^* = C_A v_A$ sehingga:

$$N_A'' = C_A v_A = J_A^* + C_A v^* \quad (2.16)$$

Dengan pengolahan persamaan dengan asumsi-asumsi dasar fluida, persamaan di atas akan menghasilkan:

$$N_A'' = -C D_{AB} \nabla X_A + X_A (N_A'' + N_B'') \quad (2.17)$$

Dari persamaan ini nampak bahwa fluks absolut molar, disebabkan dua mekanisme yaitu perpindahan difusif dan perpindahan konvektif ($X_A(N_A'' + N_B'')$).

2. Fluks absolut massa spesies A dan spesies B. Dengan cara yang sama untuk mendapatkan formula-formula pada fluks molar spesies A dan spesies B,

persamaan-persamaan untuk fluks absolut massa untuk kedua spesies diperoleh:

$$\mathbf{n}_A'' = \rho_A \mathbf{v}_A = \mathbf{j}_A + \rho_A \mathbf{v} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{n}_A'' = \mathbf{j}_A + \rho_A (\mathbf{m}_A \mathbf{v}_A + \mathbf{m}_B \mathbf{v}_B)$$

$$\mathbf{n}_A'' = -\rho D_{AB} \nabla m_A + m_A (\mathbf{n}_A'' + \mathbf{n}_B'') \quad (2.19)$$

Fenomena khusus pada media stasioner, dimana kecepatan relatif zat terhadap referensi adalah nol, dan kecepatan relatif zat terhadap kecepatan rata-rata sistem biner juga sama dengan nol. Pada keadaan stasioner ini akan beraku:

$$\text{pada } \mathbf{v}^* = \mathbf{0}; \text{ maka } N_A'' = J_A^*$$

$$\text{pada } \mathbf{v} = \mathbf{0}; \text{ maka } \mathbf{n}_A'' = \mathbf{j}_A^* \quad (2.20)$$

kondisi ini diperoleh pada pendekatan X_A (atau m_A) ~ 1 dan N_B'' (atau n_B'') ~ 0 .

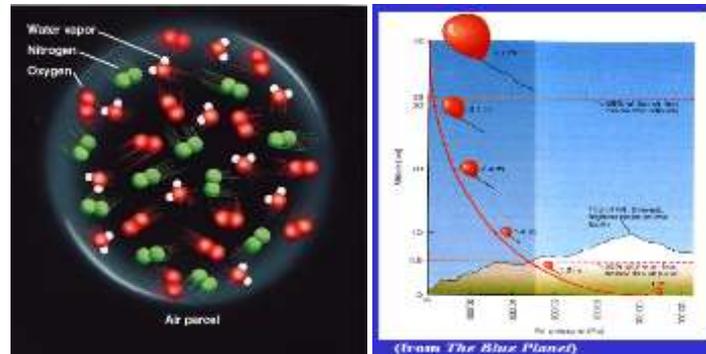
2.6.2. Termodinamika Atmosfer

Atmosfer terdiri atas campuran gas, dimana pada posisi ruang yang berbeda akan terjadi fenomena tekanan dan temperatur berbeda. Radiasi matahari merupakan *ultimate source* semua energi yang merubah iklim/cuaca. Interaksi radiasi ini dengan gas-gas atmosfer akan menghasilkan profil temperatur. Dalam tinjauan hukum termodinamika, struktur spasial temperatur atmosfer berhubungan dengan struktur spasial tekanan dan densitas gas (cocok dengan persamaan keadaan gas). Variasi spasial temperatur, akan menyebabkan perubahan tekanan, dan menimbulkan angin atmosfer. Fenomena lain di atmosfer bawah adalah perubahan fasa air. Fenomena ini akan menentukan sistem iklim di atmosfer bawah (mendung, hujan, es, dan sebagainya). Perubahan fasa ini juga dapat dijelaskan dengan termodinamika.

Dalam menyederhanakan masalah, suatu paket udara dianalisis dalam asumsi *parcel* gas/udara sebagai satu sistem termodinamika. Konsep yang dibangun untuk menjelaskan sifat *parcel* ini (asumsi) adalah:

- a. Sistem (campuran sejumlah kecil gas/udara) yang terbungkus dan dikelilingi lingkungan (atmosfer), untuk *dry air* parcel sehingga massa tetap
- b. Ukuran bisa berubah-ubah

- c. Terinsulasi dari lingkungan sehingga adiabatik dan tidak ada transfer panas
- d. Sisi batas parcel fleksibel



Gambar 2.8 Konsep parcel udara dalam tinjauan termodinamika

Dengan demikian termodinamika atmosfer secara prinsip akan menjelaskan konversi energi matahari (input) ke atmosfer dan respon atmosfer (turbulensi, sirkulasi, *link* sirkulasi dengan transfer energi (radiasi), panas sensibel dan laten antara permukaan bumi dengan atmosfer. Salah satu konsep dasar termodinamika yang penting dalam menjelaskan sifat atmosfer adalah beberapa hal berikut:

- a. Tinjauan sifat gas ideal (*variabel state*), perbandingan tekanan dan volume gas terhadap temperatur selalu tetap. Pernyataan ini dirumuskan

$$PV = nRT \tag{2.21}$$

- b. Suatu tekanan (P) dinyatakan dalam gaya (F) yang bekerja pada luas penampang *body* (A) sesuai dengan hukum Newton II, sehingga:

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{F}{A}; \quad F = \frac{nRT}{h} \tag{2.22}$$

Dimana *h* adalah ketebalan atau ketinggian gas yang membebani penampang *body*

- c. Volume, merupakan volume sistem yang diamati
- d. Konsep gas dalam kesetimbangan
- e. Hukum ke-nol termodinamika
- f. Temperatur
- g. Kerja ekspansi atau kompresi

h. Hukum pertama termodinamika dan perubahan turunannya

Jika diasumsikan udara di atmosfer merupakan gas ideal kering yang mengembang secara adiabatik, maka berlaku formulasi gas ideal, $PV = nRT$, dengan P adalah tekanan dari sejumlah volume udara kering, n = jumlah mol parcel udara, R = konstanta gas ideal dan T = temperatur absolut (K). Turunan pertama rumus di tersebut adalah:

$$d(PV) = d(nRT), \text{ sehingga } PdV + VdP = nRdT \quad (2.23)$$

Penyataan Hukum I termodinamika adalah perubahan energi dalam ΔU pada gas sama dengan kerja yang dilakukan pada system ditambah panas Q yang masuk sehingga $dU = dW + dQ$. Dalam kasus adiabatik, $dQ=0$, maka

$$dU = dW + 0 = nC_v dT \quad (2.24)$$

dan kerja akan digunakan untuk merubah volume, $dW = -PdV$, sehingga

$$PdV = -dW = -nC_v dT \quad (2.25)$$

Substitusi persamaan 2.24 dan persamaan 2.25, maka diperoleh

$$-nC_v dT + VdP = nRdT,$$

$$VdP = n(R + C_v)dT \quad (2.26)$$

karena $R = C_p - C_v$, maka $VdP = nC_p dT$

$$\frac{dT}{dT} = \frac{V}{nC_p} \quad (2.27)$$

Dari formulasi kesetimbangan hidrostatis dan gas ideal, diperoleh hubungan tekanan dengan *altitude* $dP/dz = -\rho g$ dan $\rho = nM/V$,

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{nMg}{V} \quad (2.28)$$

dengan demikian

$$\frac{dT}{dz} = \frac{V}{nC_p} \left(-\frac{nMg}{V} \right) \quad (2.29)$$

Untuk *dry adiabatic lapse rate* diperoleh (contoh kasus di Troposfer)

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{Mg}{C_p} \quad (2.30)$$

dimana:

M_a = massa molekul rata-rata atmosfer (= 29 g/mol)

g = percepatan gravitasi rata-rata di bumi (= 9,8 m/s²)

C_p = kapasitas panas atmosfer (= 29 J/K.mol)

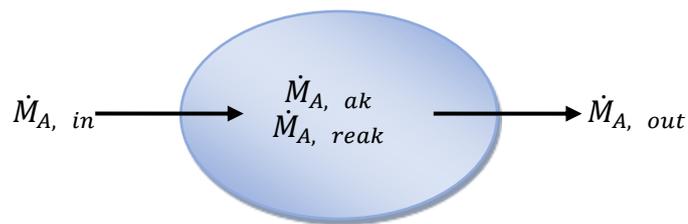
Dengan memasukkan nilai-nilai tersebut ke persamaan 2.24 akan diperoleh:

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{29 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{29 \frac{\text{J}}{\text{K.mol}}} = 9,8 \frac{\text{K}}{\text{km}}$$

Untuk kemudian, dT/dz dinamakan sebagai *lapse rate* atmosfer. Nilai perhitungan di atas menunjukkan bahwa pada kondisi adiabatik-ideal terjadi penurunan temperatur atmosfer sebesar 9,8 K setiap kenaikan elevasi (z) 1 km di troposfer.

2.6.3. Kekekalan Massa dan Spesies

Memahami proses difusi dan akumulasi suatu spesies dalam perpindahan dan perubahannya dalam suatu media, dapat dilakukan melalui penyederhanaan proses dengan meninjau satu volume media tertentu yang terbatas. Satu volume tertentu ini diasumsikan sangat kecil dan homogen, dianggap dapat mewakili sifat difusi yang terjadi pada keseluruhan media. Dalam keadaan tunak (*steady*) setiap saat (dalam waktu tertentu) terjadi kesetimbangan spesies (\dot{M}_A), dimana jumlah yang masuk pada sistem volume media akan sama dengan jumlah spesies yang keluar dari sistem volume tersebut (lihat Gambar 5.7).



Gambar 2.9 Ilustrasi difusi spesies A dalam volume kontrol

Spesies A yang masuk ke volume kontrol akan terakumulasi dalam kesetimbangan. Pada saat yang bersamaan dalam volume kontrol, spesies A dapat terkonversi menjadi spesies lain (reaksi penghilangan) dan spesies lain dapat terkonversi menjadi spesies A (reaksi pembentukan) akibat reaksi kimia homogen dalam volume kontrol

$$\dot{M}_{A,reak} = \dot{M}_{A,reak}(\text{pembentukan}) - \dot{M}_{A,reak}(\text{penghilangan})$$

dan sebagian akan keluar dari sistem volume kontrol, sehingga berlaku hubungan matematis sebagai berikut:

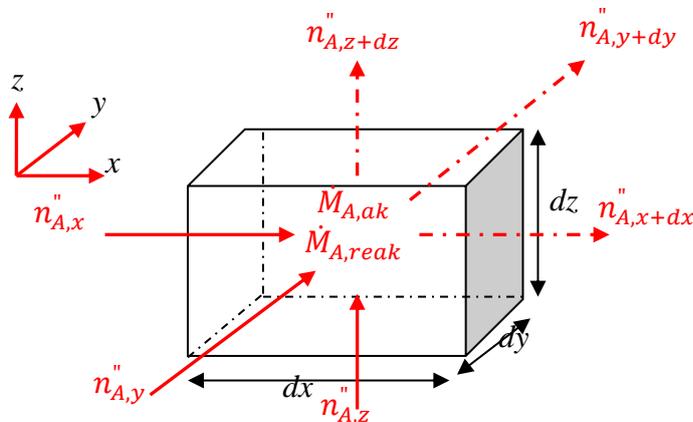
$$\dot{M}_{A,in} + \dot{M}_{A,reak} = \dot{M}_{A,ak} + \dot{M}_{A,out}$$

Perubahan spesies A dalam volume kontrol terhadap perubahan waktu adalah:

$$\frac{d\dot{M}_A}{dt} = \dot{M}_{A,ak} = \dot{M}_{A,in} - \dot{M}_{A,out} + \dot{M}_{A,reak} \quad (2.31)$$

Dimana, $\dot{M}_{A,in}$ dan $\dot{M}_{A,out}$ adalah laju perpindahan melalui permukaan volume kontrol, $\dot{M}_{A,reak}$ merupakan laju timbulan spesies A karena reaksi kimia homogen dalam volume kontrol, atau akumulasi laju konversi spesies A menjadi spesies lain dengan laju reaksi pembentukan spesies A dari zat lain, dan $\dot{M}_{A,ak}$ adalah laju akumulasi spesies A dalam volume kontrol.

Dalam diagram Cartesian, fenomena kekekalan spesies dihubungkan dengan fluks difusi dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.10 Ilustrasi difusi dan perubahan fluks spesies A dalam diagram Cartesian

Dalam diferensiasi volume kontrol seperti pada Gambar 2.5, untuk media yang stasioner dengan koefisien difusi biner atau difusifitas massa D_{AB} dan konsentrasi media C dianggap tetap, maka:

1. Persamaan difusi spesies dalam basis molar:

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} + \frac{N_A''}{D_{AB}} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (2.32)$$

2. Persamaan difusi spesies dalam basis massa

$$\frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial z^2} + \frac{n_A''}{D_{AB}} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (2.33)$$

2.7. Model-model Dispersi Pencemaran Udara Perkotaan

Secara prinsip pencemar di atmosfer setelah dilepaskan dari sumber pencemar akan mengalami perpindahan dengan beberapa mekanisme sehingga mengalami perubahan konsentrasi. Umumnya pencemar akan mengalami pengenceran karena bercampur dengan volume udara. Hipotesis pengenceran ini dalam proses perpindahan, dapat dibedakan menurut waktu evolusi dan meteorologi lingkungan (kecepatan angin, densitas udara, temperatur, kelembaban, dan lain-lain). Perubahan konsentrasi pencemar dalam perubahan waktu dinyatakan dengan difusi-adveksi atau dispersi. Adveksi berhubungan dengan pergerakan media (atmosfer) atau karena adanya kecepatan angin. Sedangkan difusi berhubungan dengan turbulensi dan perbedaan konsentrasi.

Satu acuan yang sangat berguna untuk membuat estimasi konsentrasi searah angin dari sumber pencemar tertentu satu titik di berikan oleh Hanna pada tahun 1996 (Macdonald, 2003):

$$C_{wc} = \frac{10^9 Q}{UH_{wc}W_{wc}} \quad (2.34)$$

Pemodelan pencemaran udara merupakan *tool* numerik yang digunakan untuk mendeskripsikan hubungan sebab akibat antara emisi, meteorologi, konsentrasi latar di atmosfer, faktor deposit, dan faktor-faktor lain. Dengan demikian, suatu pemodelan pencemaran udara dapat memberikan deskripsi deterministik yang lebih lengkap dibandingkan dengan monitoring dengan pengukuran lapangan. Karena pengukuran lapangan biasanya hanya menjelaskan kondisi sesaat, pada titik tertentu dan kondisi tertentu saja. Suatu pemodelan juga dapat digunakan untuk analisis faktor-faktor berpengaruh dan penyebab (sumber emisi, proses meteorologi, perubahan fisika dan kimia, dll), dan seringkali menjadi acuan dalam pengukuran untuk monitoring (Daly dan Zannetti, 2007).

Suatu sistem *modeling* dikembangkan untuk mengevaluasi volume trafik, emisi dari sumber diam dan kendaraan, dan dispersi pencemar di atmosfer perkotaan oleh Karpinen dkk, (2000), dari data Kota Helsinki selama 1993. Model ini merupakan model diskripsi yang didasarkan pada kombinasi *urban modelling system* dan *road network dispersion model* (UDM-FMI dan CAR-FMI). Sistem ini juga memasukkan model pre-prosesing meteorologikal, serta analisis statistik dan grafik dari konsentrasi pencemar serial waktu, dan interaksi kimia pencemar dari sejumlah pencemar di perkotaan, khususnya untuk NO_x dan NO₂ (Karppinen, dkk., 2000).

Pada tahun 2008, Buligon, Degrazia, Szinvelski, & Goulart, mendapatkan formula aljabar sederhana untuk menyatakan paramater-parameter dispersi, menggunakan skala waktu dekorelasi dari karakteristik lahan turbulen dalam lapisan pembatas konvektif (*convective boundary layer*). Formula ini diperoleh dengan menyelesaikan persamaan spektra kecepatan Eulerian dimensional, kondisi tidak stabil dalam PBL, dengan penurunan aljabar dan integrasi analisis. Aljabar sederhana yang dihubungkan dengan parameter dispersi teramati dalam PBL pada kondisi stabilitas yang berbeda-beda. Persamaan deviasi standar Eulerian dan Lagrangian dekorelasi skala waktu dinyatakan:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_i t}{\left[1 + 0,5 \left(\frac{t}{T_{L_i}}\right)\right]^{1/2}} \quad (2.35)$$

Sedangkan persamaan spektra kecepatan Eulerian dimensional, kondisi tidak stabil dalam PBL,

$$\frac{n S_i^E(n)}{w_*^2} = \frac{1,06 c_j f \psi^{2/3} \left(\frac{z}{z_i}\right)^{2/3}}{(f_m^*)_i^{5/3} \left[1 + 1,5 \left(\frac{f}{(f_m^*)_i}\right)\right]^{5/3}} \quad (2.36)$$

Parameter dispersi vertikal untuk kondisi konvektif (integral klasik), numerik

$$\frac{\sigma_z^2}{z_i^2} = \frac{0,29}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{\sin^2(0,98\pi\psi^{1/3}Xn')}{n'^2(1+n')^{5/3}} dn' \quad (2.37)$$

Parameter dispersi *lateral* untuk kondisi tidak stabil (integral klasik), numerik

$$\frac{\sigma_y^2}{z_i^2} = \frac{0,66}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{\sin^2(0,75\pi\psi^{1/3}Xn')}{n'^2(1+n')^{5/3}} dn' \quad (2.38)$$

Parameter-parameter diatas kemudian diaplikasikan ke persamaan Gauss untuk level konsentrasi ground *crosswind*-terintegrasi dan konsentrasi ternormalkan sepanjang garis tengah *plume* dengan kekuatan emisi Q dan ketinggian efektif plume h, dan dinyatakan dengan:

$$\frac{c_y(x,0)}{Q} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{u\sigma_z} \exp\left(\frac{-h^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

$$\frac{c(x,0,0)}{Q} = \frac{1}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-h^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Hasil dari penelitian Buligon ini adalah parameter dispersi vertikal untuk kondisi konvektif, dinyatakan sebagai:

$$\frac{\sigma_z^2}{z_i^2} = \frac{0,42\psi^{2/3}x^2}{1+(2,94\psi^{1/3}x)} \quad (2.39)$$

dan parameter dispersi *lateral* untuk kondisi tidak stabil, dinyatakan dengan:

$$\frac{\sigma_y^2}{z_i^2} = \frac{0,55\psi^{2/3}x^2}{1+(2,24\psi^{1/3}x)} \quad (2.40)$$

Kedua parameter dispersi aljabar sederhana ini dapat digunakan sebagai pengganti parameter hasil penyelesaian numerik yang lebih kompleks dengan kesesuaian tinggi. Pada dasarnya, konsentrasi zat pencemar di atmosfer ditentukan oleh beberapa fenomena dasar yaitu: 1) perpindahan zat, 2) difusi, 3) transformasi kimia, dan 4) proses deposisi kembali ke permukaan tanah (Daly dan Zannetti, 2007).

Gauss model (Sportisse, 2008) merupakan model *Plume* dan *Puff* Gauss atau model dispersi Gauss yang dapat digunakan untuk melacak pencemar yang diemisikan terus-menerus dari sumber titik yang stabil atau dapat juga untuk kasus emisi accidental. Aplikasi model ini khususnya untuk estimasi dispersi dengan kecepatan angin konstan atau dianggap konstan dan arah yang homogen, sepanjang sumbu-x. Persamaan dispersi ini diturunkan dari persamaan dasar Navier-Stokes 2-D pada arah sumbu x berikut:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2.41)$$

Pada titik awal emisi (sumber) dimana $(x,y,z) = (0,0,0)$ dan $t = 0$, maka konsentrasi awal dinyatakan dengan $C(x,y,z,0) = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z)$. Penyelesaian yang baik dapat digunakan fungsi Gauss yang menyatakan sebaran normal, sehingga:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi t)^{3/2} \sqrt{K_x K_y K_z}} \exp \left[-\frac{(x-ut)^2}{4K_x t} - \frac{y^2}{4K_y t} - \frac{z^2}{4K_z t} \right] \quad (2.42)$$

Dalam arah sumbu $-x$ saja, kemudian ditentukan varian $2K_x t$ (dan akan dituliskan sebagai nilai empiris sebagai σ_x). Penurunan lebih lanjut untuk kondisi pencemar yang diasumsikan stasioner dengan sumber kontinyu (terhadap perubahan waktu) dan titik emisi pada $(x,y) = (0,0)$ dengan ketinggian efektif h , maka konsentrasi pada penerima dengan ketinggian z pada lokasi (x,y) adalah:

$$C(x, y, z, h) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_x} \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[\exp \left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] \quad (2.43)$$

Nilai varians σ_y^2 dan σ_z^2 diberikan dengan parameterisasi sebagai fungsi jarak dari titik sumber dan kondisi meteorologi lingkungannya. Menurut persamaan ini maka:

1. Pencemar akan mengalami pengenceran karena perpindahan menjauhi sumber pencemar. Semakin jauh dari sumber pencemar maka konsentrasi pencemar ambien akan semakin kecil. Dengan demikian konsentrasi terbesar akan berada di sekitar sumber pencemar.
2. Pada pencemar yang dilepas pada ketinggian tertentu (h), maka konsentrasi maksimum pada permukaan tanah (ground, $z = 0$) akan berada pada jarak tertentu dari sumber pencemar. Kecepatan angin yang lebih besar akan menggeser konsentrasi maksimum penerima bergeser menjauhi sumber.
3. Pada beban sumber yang identik, maka konsentrasi penerima dipengaruhi oleh kecepatan angin dan stabilitas atmosfer. Semakin besar kecepatan angin, maka dispersi semakin cepat pada area yang lebih sempit dan panjang, sehingga konsentrasi pencemar pada titik penerima akan semakin kecil. Stabilitas atmosfer merupakan ukuran turbulensi di atmosfer, sehingga semakin stabil atmosfer maka pengenceran akan semakin kecil.

Secara umum model Gauss ini mudah digunakan, lebih populer terutama untuk aplikasi estimasi dari sumber linear atau *passive*, dan dispersi kisaran-pendek (*short-range dispersion*).

Model lain adalah model perpindahan kimia. Model perpindahan kimia ini juga merupakan model yang menjelaskan dispersi pencemar dengan tambahan kajian kinetika reaksi untuk pencemar non konservatif atau reaktif. Persamaan dispersi reaktif dapat ditulis dalam bentuk:

$$\frac{dC}{dt} = \sum_{j=1}^{n_p} f_j(C) \quad (2.44)$$

Dimana n_p adalah banyaknya proses yang dihitung dan $f_j(C)$ sumber yang dihubungkan dengan proses j (adveksi, difusi, kinetika kimia, dan sebagainya). Untuk proses tunggal $j=1$, maka persamaan dapat dinyatakan:

$$\frac{dC}{dt} = f_j(C) \quad (2.45)$$

yang dapat diselesaikan dengan proses integrasi atau numerik. Contoh penyelesaian model kimia ini, adalah model Reaksi-Adveksi, yang menyatakan:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla C = \chi(C) \quad (2.46)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial C}{\partial x} = \chi(C) \quad (2.47)$$

Untuk 1-D, adveksi diasumsikan pada satu arah sumbu-x.

2.8. Kinetika Reaksi Kimia

Proses-proses yang digunakan dalam menjelaskan perubahan materi yang melibatkan transformasi kimia atau fisika, dikontrol oleh suatu laju reaksi, laju perubahan, atau laju proses. Dengan demikian konsep kinetika dan termodinamika proses dan formulasi persamaan laju reaksi merupakan hal pokok dalam pendeskripsian transfer massa materi dan reaksi baik kimia maupun fisika.

Berdasarkan fasa zat pereaksi maupun media, suatu reaksi digolongkan ke dalam dua kategori yaitu reaksi homogen dan reaksi heterogen. Kedua reaksi ini dibedakan secara prinsip oleh jumlah fasa zat yang terlibat dalam reaksi dan keberadaan interface yang memisahkan antar fasa. Secara umum laju reaksi komponen zat A dinyatakan dalam persamaan:

$$\left(\frac{\text{massa } A}{\text{waktu}}\right)_V = (\text{laju reaksi } A - \text{laju pembentukan } A) \quad (2.48)$$

Pada reaksi homogen, dimana semua reagen berada dalam satu fasa dan dengan demikian tidak ada interface, maka persamaan reaksi tersebut dinyatakan

$$\begin{aligned} -v_r \frac{dC_A}{dt} &= v_r k_{r,f} C_A^n \\ -\frac{dC_A}{dt} &= k_{r,f} C_A^n = k_{r,f} C_{A,b} - k_{r,r} C_{A,r} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Sedangkan pada reaksi heterogen, reaksi terjadi dengan reagen-reagen terbagi dalam dua fasa atau lebih dan ada *interface* antar fasa sebagai pembatas transfer, persamaan laju reaksi dapat dinyatakan,

$$-v_r \frac{dC_A}{dt} = A_r k_r (C_{A,b} - C_{A,e}) \quad (2.50)$$

Dengan membuat konstanta perbandingan *interface* terhadap volume reaktor $\frac{A_r}{v_r} = a_v$, maka persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk sederhana menjadi

$$-\frac{dC_A}{dt} = a_v k_r (C_{A,b} - C_{A,e}) \quad (2.51)$$

Dalam persamaan tersebut v_r , A_r , $C_{A,b}$ dan $C_{A,e}$ berturut-turut adalah volume reaktor, luas permukaan *interface* yang tersedia, konsentrasi A bulki dan konsentrasi A kesetimbangan. Notasi k_r , $k_{r,f}$ dan $k_{r,r}$ menunjukkan konstanta laju reaksi total, laju reaksi *forward*, dan laju reaksi *reverse* pada reaksi tersebut.

2.9. Membandingkan Model dengan Data

Model lebih lanjut harus dibandingkan dengan data-data pengukuran (observasi) atau pemantauan. Dalam hal ini beberapa hal bisa dipilih menurut kemungkinannya yaitu:

- Berdasarkan estimasi spasial (ruang) atau area, periode waktu, reaksi kimia atau *radiative*
- Berdasarkan pengukuran di ground station, profil vertikal, sensor udara, data satelit

Membandingkan model dengan data akan memberikan relevansi yang lebih utama jika dibandingkan dengan validasi model (Sportisse, 2008). Evaluasi performa

model secara ketat telah didefinisikan seperti dalam US-EPA. Indikator statistik digunakan tergantung pada tujuan dan aplikasinya:

- a. Untuk pelepasan pencemar *accidental* (emisi pencemar dari sumber titik) indikator difokuskan pada kemampuan model untuk memperkirakan atau estimasi (*forecast*) waktu kedatangan *plume* pencemar pada titik tertentu atau menentukan nilai maksimum yang mungkin terjadi.
- b. Untuk fotokimia, biasanya ditujukan untuk memperkirakan difusi.

Beberapa indikator statistik untuk membandingkan model dengan data observasi antara lain seperti pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2. 2 Indikator statistik model-data dan simulasi n elemen. Nilai model (y_i) dan observasi (obs_i) (Russel & Dennis, 2000)

Indikator	Notasi	Persamaan
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - obs_i)^2}$
Bias	Bias	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - obs_i)^1$
Mean Fractional Bias	MFB	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2(y_i - obs_i)}{(y_i + obs_i)}$
Mean Fractional Error	MFE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2 y_i - obs_i }{(y_i + obs_i)}$
Correlation	Corr	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(obs_i - \bar{obs})}{\sqrt{(y_i - \bar{y})^2} \sqrt{(obs_i - \bar{obs})^2}}$
Mean Normalized Bias Error	MNBE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - obs_i}{obs_i}$
Mean Normalized Gross Error	MNGE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ y_i - obs_i }{obs_i}$
Unpaired Peak Prediction Accuracy	UPA	$\frac{y_{max} - obs_{max}}{obs_{max}}$

Rekomendasi EPA untuk batas nilai yang bisa digunakan adalah MNBE ($\pm 5\%$), MNGE ($\pm 30\%$), dan UPA ($\pm 15\%$) untuk konsentrasi ozon dengan konsentrasi 40 – 60 ppb. Sedangkan untuk NO₂ menggunakan AirBase 1049 station) dinyatakan obs rata-rata (23.9), y rata-rata (15.3), RMSE (14.2), Corr (57.2), MFB (-37), dan MFE (62) (Sportisse, 2008) dan (Sartelet, et al., 2007).

2.10. Tool dalam Pembuatan Model: Program MATLAB

MATLAB atau matrix laboratory adalah bahasa level tinggi dan interaksi lingkungan untuk komputasi numerik terintegrasi, visualisasi, dan pemrograman. Bahasa MATLAB yang berbasis matriks merupakan jalan natural untuk menyatakan komputasi matematik (MathWork, 2016). Menggunakan program ini dapat dilakukan analisa dan akuisisi data, matematika dan komputasi, mengembangkan algoritma, dan membuat serta mengaplikasi model dan prototipe, dan sebagainya. Program ini juga merupakan bahasa modern yang sangat baik dalam mengolah struktur data, *debugging*, dan pemrograman berorientasi objek. Dengan demikian program ini sangat unggul sebagai tool dalam pengajaran dan riset (Houcque, 2005)

Adanya bahasa program, *tool*, dan *built-in* fungsi matematika memungkinkan eksplorasi multi-pendekatan dan mencapai pemecahan yang lebih cepat dibanding dengan *spreadsheet-spreadsheet* atau bahasa pemrograman tradisional seperti C/C++ atau Java. Program MATLAB ini dapat diaplikasikan dalam rentang yang luas termasuk pemrosesan sinyal dan komunikasi, gambar dan video, sistem kontrol, uji dan pengukuran, komputasi dan sebagainya. MATLAB merupakan sistem interaktif dengan dasar elemen data dalam sebuah array yang tidak memerlukan dimensi. Hal ini memungkinkan untuk menyelesaikan beberapa masalah perhitungan teknik sekaligus, terutama dengan formulasi vektor dan matriks dalam fraksi waktu.

Sistem MATLAB setidaknya terdiri atas beberapa bagian utama (MathWork, 2008):

1. Tool Dekstop dan Lingkungan pengembangan. Merupakan paket *tool* yang membantu dalam penggunaan lebih produktif dengan fungsi MATLAB dan file. Fasilitas ini termasuk MATLAB dekstop dan Command Windows
2. Librari fungsi matematika. Librari ini merupakan kumpulan dari algoritma fungsi-fungsi elementer dan pengembangannya seperti statistik umum, sinus, cosinus, dan aritmatik kompleks, sampai fungsi-fungsi sofikastik seperti matriks invers, nilai *eigen*, fungsi Bessel, dan transformasi Fourier.

3. Bahasa pemrograman. Bahasa MATLAB adalah bahasa *matrix/array* level tinggi dengan kontrol statemen alur, fungsi, data struktur, input-output, dan fitur pemrograman berorientasi objek.
4. Grafik. Fasilitas ekstensif untuk menampilkan vektor dan matriks seperti grafik. Ini juga termasuk fungsi untuk visualisasi data 2-D dan 3-D, pemrosesan gambar, animasi, dan sebagainya.
5. Interface eksternal. Fasilitas ini memungkinkan interaksi MATLAB dengan program lain seperti Fortran, C, excell, dan sebagainya. Salah satu fasilitas ini adalah pembacaan dan penulisan MAT-files.

Lebih lanjut, fungsi-fungsi matematik dan bahasa program dalam MATLAB dapat diakses pada berbagai literatur dan fungsi *help* pada *software* MATLAB. Pada disertasi ini digunakan program MATLAB R2013a (8.1.0.604) 32-bit (win 32) Februari 15, 2013 (lisensi manager kampus ITS, dengan nomor lisensi 872393).

---o0o---

BAB 3

RANCANGAN KERJA PENELITIAN

3.1. Identifikasi Keterkaitan Riset dengan Penelitian Terdahulu

Meskipun sangat sulit menegaskan dalam satu kelompok yang signifikan, penelitian-penelitian yang telah dikembangkan beberapa dekade terakhir setidaknya dapat *review* dalam peta penelitian (*road map research*) seperti pada Tabel 3.1. Model distribusi pencemar udara perkotaan yang dibangun dalam penelitian ini merupakan kombinasi model diagnostik matematik dengan model simulasi deskriptif. Secara prinsip model akan dibangun dengan dasar matematik, kinetika dan kesetimbangan, serta meteorologi (stabilitas atmosfer). Kemudian diverifikasi dengan data monitoring yang relevan.

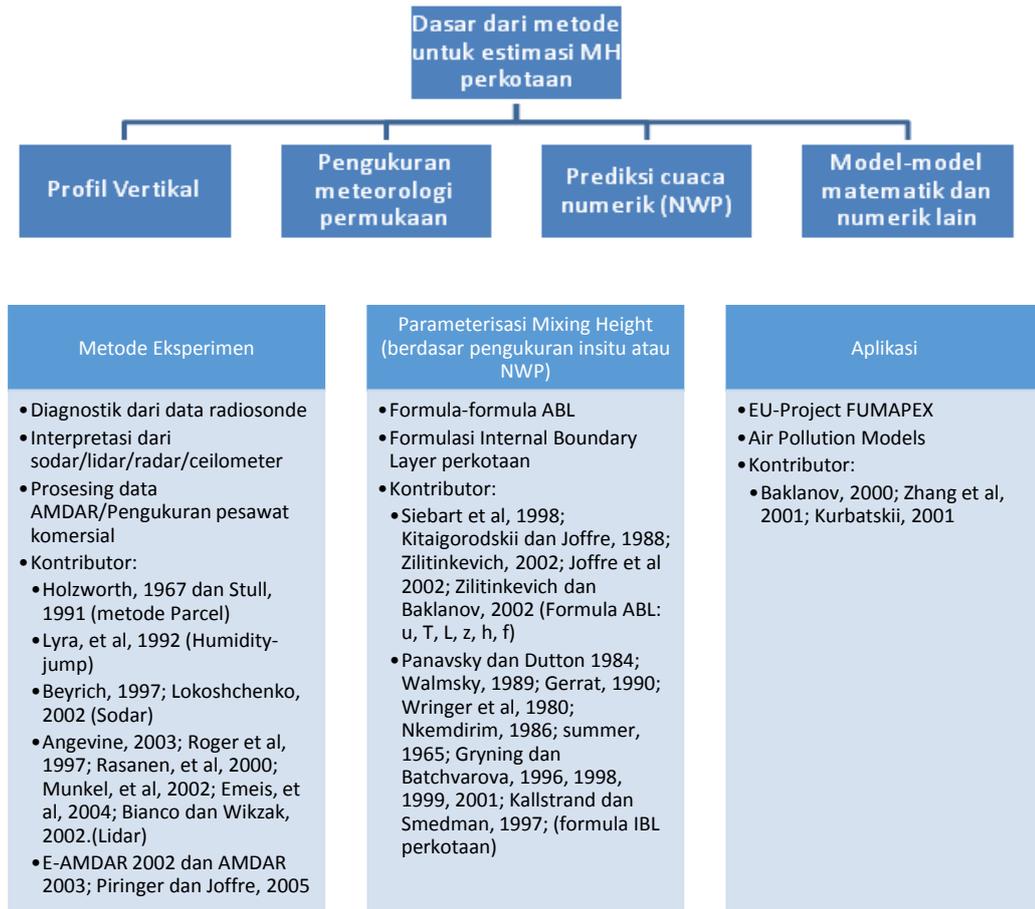
Tabel 3.1 Perkembangan Penelitian UBL, PBL, dan Mixing Height

Rentang Tahun	Kontributor	Highlight	Parameter formulasi										
			u	T	f	L	B	w	N	K	Q	R	
2014-2016	Assomadi A.F; Hermana J.H; Widodo B., 2016	MH perkotaan ditinjau dari fungsi kesetimbangan di atmosfer (dipengaruhi GRAD, fluks panas), gravitasi, temperatur, angin, dsb	√	√	√							√	√
2001-2013	Du, dkk., 2013	PBL merupakan parameter fisik kritis dalam mengevaluasi pencemar di atmosfer		√									
	Sun, dkk., 2013	Data series menunjukkan korelasi positif temperatur vs radiasi uv, dan berkorelasi negatif dengan humidity Dalam 320 m BL, distribusi T,R, uv inhomogen		√								√	√
	Liu dan Lang, 2010	evaluasi hasil Nozaki untuk menentukan tinggi maksimum PBL yang terjadi siang hari, ketika musim panas dan kecepatan angin maksimum		√									
	Joffre & Kangas, 2002		√			√				√			
	Zilitinkevich & Baklanov, 2002	MH dipengaruhi oleh koefisien difusifitas horisontal dan kesetimbangan MH itu sendiri (hasil formulasi diagnostik)				√					√		
	Zilitinkevich et al, 2002		√			√				√			

Rentang Tahun	Kontributor	Highlight	Parameter formulasi												
			u	T	f	L	B	w	N	K	Q	R			
	Joffre & Kangas, 2001	Model heriustik MH untuk kondisi stabil (eresma, 2006)	√			√			√						
1981-2000	Gryning & Batchvarova, 1991		√	√		√		√							
	Zilitinkevich dan Mironov, 1996		√		√	√			√						
	Lyra, 1992													√	
	Batchvarova & Gryning, 1991	model skema irisan orde-nol untuk IBL diatas terrain dengan perubahan kekasaran permukaan, kondisi atmosfer netral dan tidak stabil;	√	√											
	Batchvarova & Gryning, 1991		√	√		√									
	Nkemdirim, 1986; Henderson-Sellers, 1980	MH perkotaan sebagai fungsi jarak downwind menuju kota	√											√	
	Nieuwstadt, 1984		√		√		√								
	Mahrt, 1982		√		√										
	Nieuwstadt, 1981		√		√	√									
	Arya, 1981		√		√	√	√								
	Arya, 1981		√		√										
Tennekes & Driedonks, 1981			√										√		
1961-1980	Venkantram, 1980		√		√				√						
	Benkley dan Schulman, 1979		√												
	Tennekes, 1973		√	√									√		
	Nozaki, 1973	didasarkan pada teori ABL hasil dari turbulensi termodinamika dan dinamika udara untuk menentukan tinggi PBL tiap jam		√	√										
	Dierdroff, 1972		√		√	√									
	Zilitinkevich, 1972	Pendekatan klasik untukMH stabil, lapisan-Ekman (Eresmaa, et al. 2006)	√		√	√									
	Holzworth, 1967	metode parcel udara untuk menentukan ketinggian maksimum dan minimum tinggi PBL harian													
----- 1960	Rosby & Montgomery, 1935	Model netral klasik, untuk kondisi stabil	√		√										

Kajian dalam pendekatan model distribusi pencemaran udara perkotaan dalam penelitian ini mencakup setidaknya pada tiga bidang pemodelan atau keilmuan yaitu model pencemaran udara, model meteorologi dan atmosfer, dan model kebijakan pengelolaan dan penetapan regulasi standar emisi pencemar.

Model-model untuk kajian meteorologi dan kestabilan atmosfer dalam dispersi pencemaran udara banyak diarahkan pada penentuan batas volume pencampuran dengan *mixing height*. Model-model ini telah dikembangkan seperti tercantum dalam bagan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.9 Metode-metode untuk mengestimasi MH perkotaan (Baklanov, dkk., 2006)

3.2. Konsep Permodelan dalam Penelitian

Secara global pokok pikiran dalam penelitian ini tercantum seperti terlihat pada Gambar 3.2. Prinsip-prinsip permodelan dispersi dan perkembangan model diacu pada teori-teori pendukung dan hasil penelitian yang telah dipublikasikan baik dari jurnal maupun *textbook*. Dengan memanfaatkan seri data skunder selama 5 tahun atau lebih, prinsip kinetika reaksi dan transformasi zat di atmosfer, maka model dispersi dibangun dengan koreksi nilai konstanta untuk kinetika. Koreksi nilai kinetika ini perlu dilakukan untuk mendapatkan model dispersi yang

mendekati data sifat data skunder seri waktu selama 5 tahun, dan menggambarkan karakteristik wilayah yang dimodelkan.

Dalam membangun model dispersi ini, dibuat konsep membangun model dispersi pencemaran di perkotaan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

a. Analisis dan pengolahan data-data emisi.

Dilakukan dengan (1) evaluasi jarak efektif sumber ke penerima, didasarkan pada arah angin dan kecepatannya dan jarak lurus sumber-penerima sebagai fungsi koordinat; (2) menghitung beban emisi, didasarkan pada data emisi (sumber emisi, jumlah, koordinat), faktor emisi, laju alir, suhu, dan tekanan sumber; dan (3) prediksi arah emisi dan besar emisi masing-masing sumber.

b. Analisis volume dispersi dan membangun model estimasi *mixing height*

Analisis dan membangun model berdasarkan (1) pengaruh meteorologikal (suhu, tekanan atmosfer, kelembaban, *mixing height*, dan sebagainya); dan (2) kesetimbangan massa, momentum, energi/radiasi, dan gravitasi-*bouyancy*.

c. Membangun model distribusi pencemar di atmosfer

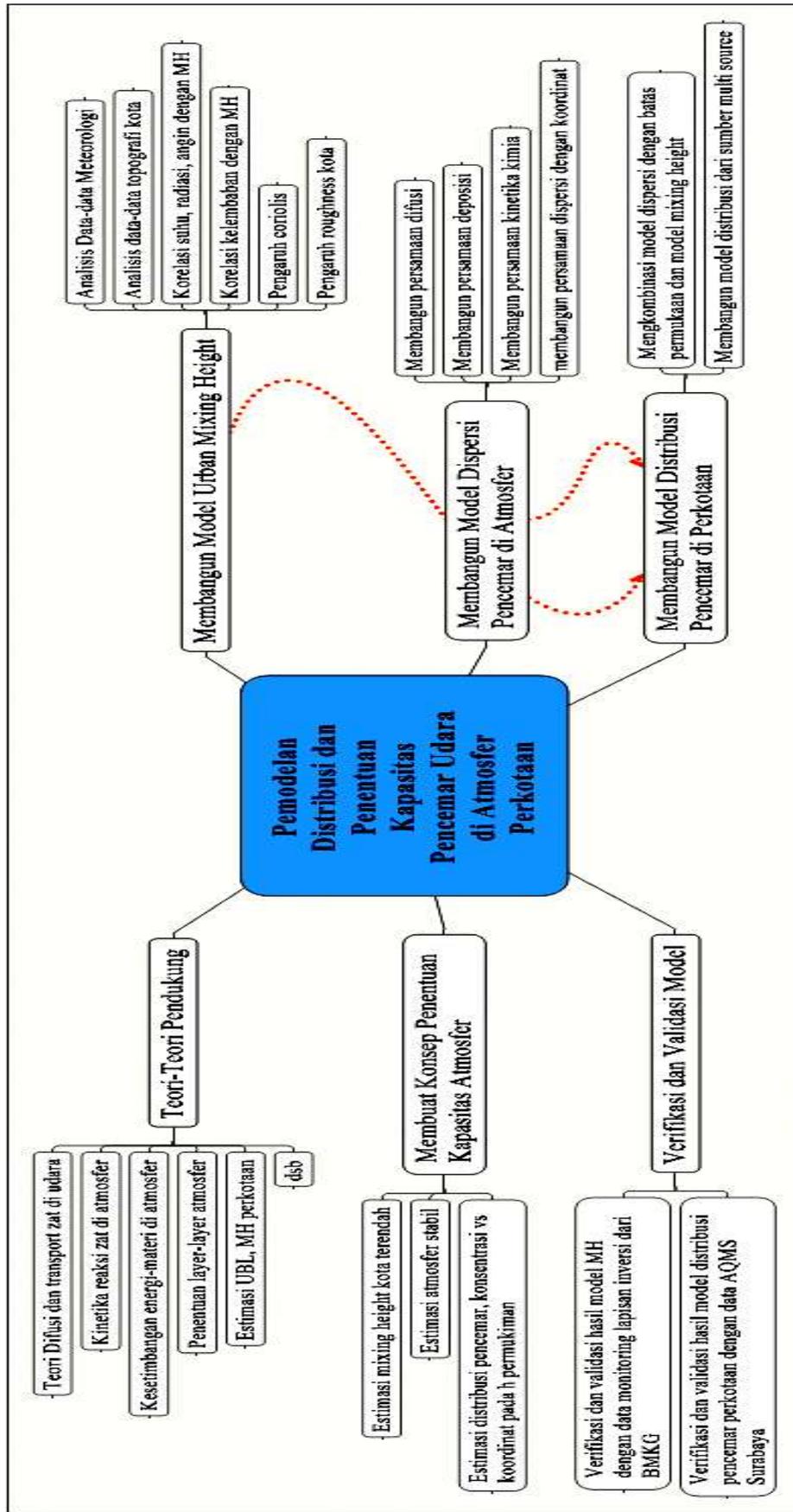
Membangun model dan prediksi perubahan konsentrasi pencemar di atmosfer, didasarkan pada kinetika perpindahan gas di atmosfer, kinetika reaksi di atmosfer, jarak/waktu detensi sumber-penerima, untuk menentukan rumus dan konstanta perubahan.

d. Mengakumulasi beban dan konsentrasi dispersi

Akumulasi beban antara lain (1) beban dari beberapa *point source* ke penerima, (2) beban dari beberapa *line source* ke penerima, dan (3) prediksi perubahan konsentrasi karena perpindahan dan reaksi.

e. Menguji (verifikasi) model

Menguji model dengan model-model terdahulu dan data-data sekunder dengan *trial* and simpangan untuk mendapatkan deviasi terkecil dengan data serta *trial* dan simpangan untuk mendapatkan suatu nilai konstanta (K) yang representatif dari model-model yang dihasilkan. Nilai K ini akan menjadi ciri atau karakteristik model dispersi pencemar di perkotaan yang dikaji.



Gambar 3.10 Konsep Pembuatan Model dalam Penelitian

3.3. Metodologi

Sesuai dengan tujuan penelitian, dilakukan langkah-langkah dalam 3 kegiatan pokok, yaitu 1) pengumpulan data sekunder dan kajian kinetika reaksi di atmosfer, 2) analisis data meteorologi dan membangun model *mixing height*, 3) analisis data emisi dan menggabungkan kegiatan 1 dan 2 untuk membangun model distribusi polutan di perkotaan. Model-model yang terbangun kemudian diverifikasi dengan model-model terdahulu dan data-data yang ada. Pengumpulan data meliputi kegiatan kajian teori dan pengumpulan data sekunder, termasuk melakukan kajian terhadap penelitian dan studi terdahulu yang terkait. Kegiatan analisis dan membangun model adalah melakukan proses perhitungan yang dapat menghasilkan gambaran dispersi.

Dalam tahapan ini dikaji/analisis semua data skunder dan teori kinetika pengurangan pencemar di atmosfer untuk dijadikan formula/model matematis didasarkan pada persamaan dispersi. Model yang dihasilkan kemudian diverifikasi untuk menguji simpangan nilai hasil prediski model dengan hasil pengukuran lapangan. Model terbangun dinyatakan baik dan *verified* jika simpangan (RMSE) dan korelasinya dengan data pembanding mendekati standar US-EPA seperti pada sub bab 2.8.

3.3.1. Pengumpulan Data

Pengembangan model dispersi perkotaan dalam penelitian ini, setidaknya membutuhkan data-data untuk melakukan verifikasi dan korelasi, posisi sumber pencemar, beban pencemar, prediksi pergerakan pencemar, prediksi beban penerima, dari output model yang dibangun. Untuk keperluan hal tersebut maka dikumpulkan data-data sekunder selama 5 – 10 tahun. Data-data tersebut antara lain seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Jenis data, kurun waktu dan sumber

Jenis Data	Kurun Waktu	Sumber data
Stack Industri <ul style="list-style-type: none">• Posisi/koordinat• Beban emisi/proses	5 tahun	Dinas LH / BLH / Dinas Perindustrian/ Hasil Penelitian Terdahulu
Perpindahanasi	5 tahun	Dinas Perhubungan / Dispenda atau

Jenis Data	Kurun Waktu	Sumber data
<ul style="list-style-type: none"> Traffic load, kepadatan dan kecepatan rata-rata Kelas Jalan Faktor Emisi Jumlah dan jenis kendaraan operasional 		instansi lain yang relevan
Penerima beban pencemaran / perubahan <ul style="list-style-type: none"> jumlah penerima 	5 tahun	Hasil penelitian terdahulu
Kualitas udara ambien Data pemantauan rutin industri / LH, AQMS, Data ISPU	5 tahun	Data penduduk (BPS), Data RTRW Kota dan perubahannya
Meteorologi Kecepatan dan arah angin Solar radiation Kelembaban, Ketinggian Lapisan Inversi atau <i>mixing height</i>	5 tahun	Dinas LH dan BLH
		BMKG

3.3.2. Analisis Data

Data-data yang telah dikumpulkan dari berbagai literatur dan instansi terkait, kemudian dianalisis untuk meyakinkan bahwa data-data tersebut layak digunakan dalam penelitian. Secara prinsip data-data sekunder yang digunakan adalah benar dan telah dipublikasi oleh instansi penghasil data. Beberapa langkah analisis perlu dilakukan untuk memenuhi konsistensi dan keperluan model yang dibangun. Langkah-langkah tersebut yaitu:

3.3.2.1. Penentuan Kecukupan Data

Data-data perlu dinyatakan cukup terutama untuk verifikasi dan membandingkan hasil model. Data-data dinyatakan cukup jika memenuhi kriteria antara lain:

- setidaknya memenuhi jumlah 90 % untuk seri data pada rentang waktu yang digunakan untuk verifikasi dan membandingkan model. Rentang waktu tersebut antara lain rentang harian (48 data), 2 harian (98 data), 3 atau 4 hari (196 data), dan 7 harian (336 data).

- pada rentang waktu yang ditentukan, maka data-data yang disortir maksimum 10 %, karena data tidak terukur/tersedia atau nilai *outlayer*.
- data-data yang stabil (nilainya tetap pada rentang waktu tertentu) menunjukkan adanya masalah pada alat pengukuran. Data yang menunjukkan gejala ini tidak digunakan dalam verifikasi model atau sebagai inputan model.
- Untuk melengkapi data, dapat digunakan metode penambahan data pada rentang-rentang tertentu yang tidak ada data, seperti dijelaskan pada sub bab 3.3.2.1.

3.3.2.2. Pengolahan Data (Sorting Data, Data Outlayer, dan melengkapi data yang diperlukan)

Data-data yang dalam analisis menunjukkan simpangan yang besar, atau bernilai sangat kecil atau nol, atau bernilai sangat besar (ekstrim) menunjukkan data tidak konsisten atau karena kejadian tidak normal, data-data seperti ini tidak digunakan dalam penelitian. Data-data tersebut *disorting* dan dinyatakan *outlayer*. Untuk melengkapi data-data yang dihilangkan, maka diperlukan metode untuk menambahkan data sehingga tetap menjadi cukup atau lengkap untuk verifikasi (analisis). Langkah-langkah menambahkan data tersebut antara lain (IPCC 2007):

- metode *overlap*. Memungkinkan untuk membuat data time series (yang hilang, y_0) berdasarkan pada hubungan (atau *overlap*) data-data pengamatan antara dua sumber terdekat (x_0) pada waktu yang sama. Persamaan yang digunakan adalah:

$$y_0 = x_0 \left(\frac{1}{n - m + 1} \sum_{i=m}^n \frac{y_i}{x_i} \right)$$

- *surrogate* data. Melakukan pendekatan data berdasarkan perubahan sumber (parameter) yang mempengaruhinya. Data-data yang hilang dapat didekati dengan membandingkan data yang diketahui dihubungkan sumber yang mempengaruhinya dengan data yang dicari dihubungkan dengan sumber yang berubah. Persamaan yang digunakan:

$$y_0 = y_t (S_0 / S_t)$$

- *Interpolasi* data. Jika dimungkinkan menggunakan data sebelum dan data sesudah yang hilang untuk melakukan intrapolasi berdasarkan kecenderungan data. Interpolasi juga dapat dilakukan dengan menggunakan nilai rata-rata data yang diketahui (sebelum dan sesudah data yang hilang)
- *Extrapolasi* data. Dalam kasus umum kecenderungan data yang konsisten akan memberikan data yang mempunyai kecenderungan tertentu. Data-data yang hilang di awal atau di akhir seri data dapat didekati dengan ekstrapolasi data dengan menggunakan kecenderungan data series.

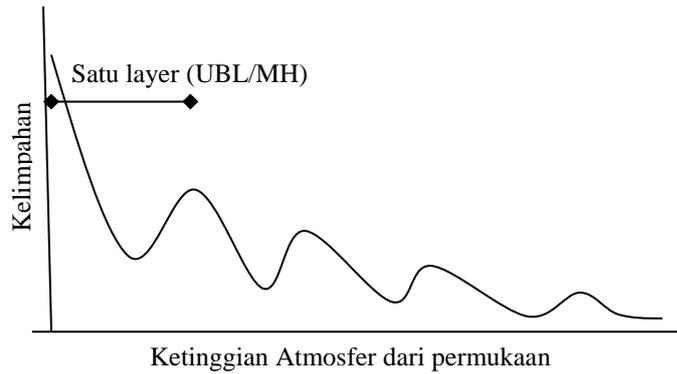
3.3.3. Membangun model

Secara prinsip dalam penelitian ini dibangun model distribusi pencemar di perkotaan. Seperti dijelaskan pada bab-bab sebelumnya, dispersi pencemar di perkotaan dipengaruhi oleh beban emisi, proses perpindahan (dispersi dan difusi), dan pengurangan karena reaksi kimia atmosfer (kinetika reaksi) dan fenomena fisika (deposisi, perubahan fasa). Proses perpindahan akan sangat dipengaruhi oleh volume yang tersedia bagi pencemar untuk berdistribusi, yang ditentukan oleh aliran angin dan tinggi pencampuran (*mixing height*). Sehingga model distribusi pencemar di perkotaan pada penelitian ini akan dibangun dengan tiga tahap yaitu:

3.3.3.1. Model estimasi *mixing height* atau *urban boundary layer*

Dibangun berdasarkan asumsi resultansi kesetimbangan dan perubahannya pada perubahan ketinggian atmosfer $\left(\frac{dS}{dz}\right)$. Kesetimbangan tersebut antara lain kesetimbangan materi (kesetimbangan gas), kesetimbangan gravitasi dan gaya apung (*bouyancy* dan massa jenis gas), kesetimbangan energi (kesetimbangan suhu, radiasi-serapan-emisi, dan seterusnya), kasus khusus kesetimbangan kandungan air (kelembaban).

Beberapa hipotesis dibuat untuk mengarahkan penyelesaian persamaan model. Pertama, kelimpahan massa gas karena empat kesetimbangan di atas akan secara teratur berubah dengan variasi ketinggian, ilustrasi hipotesis tersebut seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.11 Asumsi profil siklus perubahan kelimpahan gas di atmosfer perkotaan

Asumsi kedua, satu layer atmosfer *mixing height* ditandai dengan satu siklus kelimpahan massa gas (C) (lihat Gambar 3.3) dan atau satu lapisan inversi (perubahan gradien suhu atmosfer).

Dengan demikian asumsi dasar persamaan untuk model estimasi *mixing height* adalah titik belok pada profil konsentrasi gas dan profil energi (perubahan suhu). Satu *mixing height* atau satu lapisan inversi dapat dinyatakan dalam persamaan asumsi umum sebagai berikut:

$$h = \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = f \left(\text{kesetimbangan} \left[\frac{dC}{dz}, \frac{dT}{dz}, \frac{dR}{dz}, \frac{dH_2O}{dz} \right] \right) \quad (3.1)$$

Persamaan ini akan dicari penyelesaiannya berdasarkan empat fungsi kesetimbangan di atas. Secara garis besar proses membangun model estimasi *mixing height* dinyatakan dalam *fishbone* pada Gambar 3.5.

3.3.3.2. Model distribusi pencemar

Pembangunan model distribusi didasarkan pada persamaan dasar dispersi. Nilai-nilai konstanta dispersi yang diperoleh kemudian dikoreksi dengan kinetika reaksi zat di atmosfer dan penyerapan/pengurangan polutan karena adanya RTH, deposisi, dan sebagainya. Koreksi ini akan menghasilkan koefisien model yang sesuai untuk daerah yang dikaji/dimodelkan.

Untuk proses ini dibuat asumsi antara lain pada wilayah kajian terdapat beberapa sumber titik (elevasi h) dan beberapa sumber garis (elevasi nol), arah dan kecepatan angin dianggap rata-rata homogen, kestabilan atmosfer homogen,

kekasaran kota dibuat rata-rata, ada pengurangan karena reaksi kimia orde tertentu ($dC/dt = kC^n$) yang sama untuk semua titik dan difusi ke arah y dan z .

Dalam tahap awal membangun model, dibuat kondisi sederhana dengan 2 *point source* dan 2 *line source* emisi pada koordinat P1 (x_1, y_1, z_1, H_1); P2 (x_2, y_2, z_3, H_2); L1 (x_1', y_2', z_1', H_1'); dan L2 (x_2', y_2', z_2', H_2'). *Layout* untuk penyederhanaan kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.5, dan 3.6. Jika dianggap sumber yang masuk ke *box* merupakan campuran dengan C_0 , maka akan sangat sulit menghitung C_0 dari data-data sumber, sebab posisi (jarak) sumber yang berbeda-beda sehingga kontribusi terhadap nilai C_0 juga berbeda. Maka akan lebih mudah jika model diasumsikan awalnya berasal dari satu sumber yang dalam *box* tertentu ada tambahan sumber, sehingga *layout*nya bisa diasumsikan seperti pada Gambar 3.6.

Pada volume kontrol seperti pada Gambar 3.6 tersebut akan berlaku,

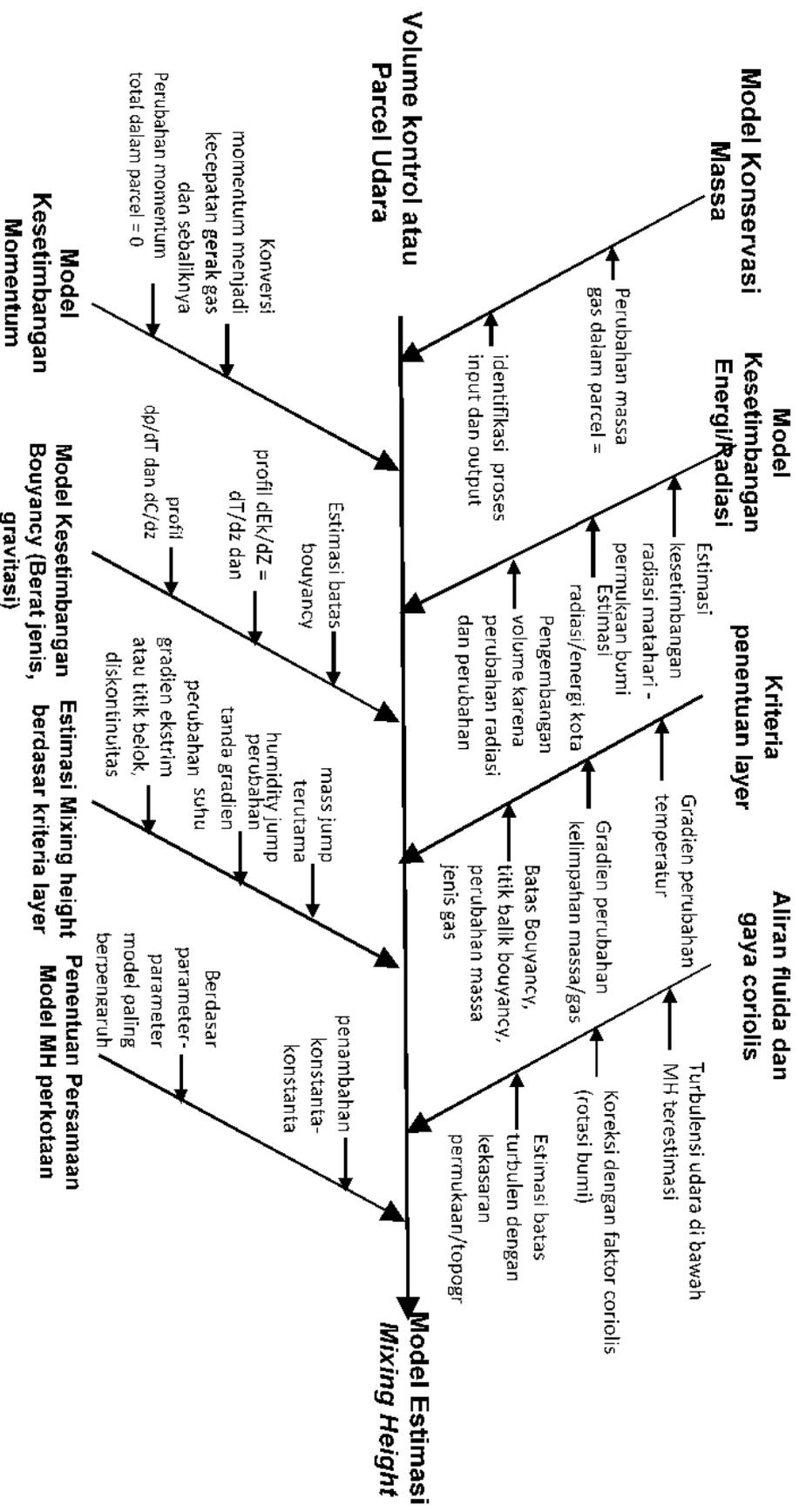
$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial C}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial C}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u}C) = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C) + \frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C) = 0$$

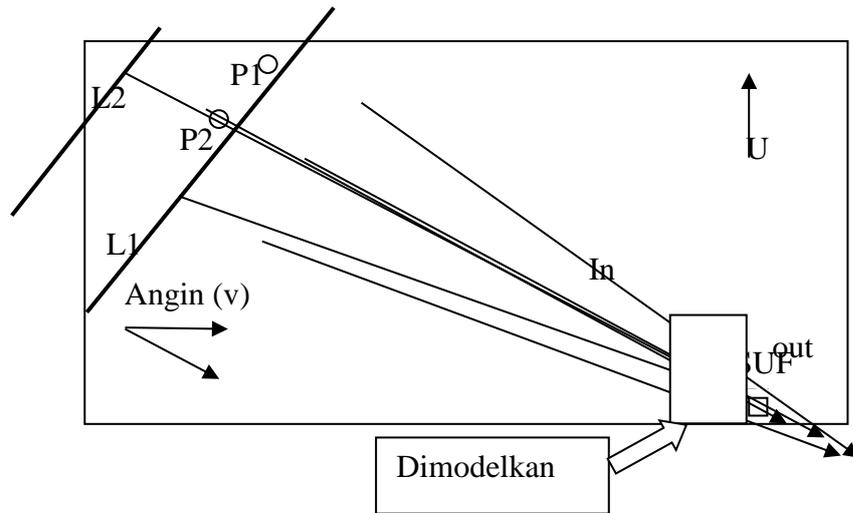
$$\frac{DC}{Dt} = S(x, y, z, t) \quad \text{dan} \quad \frac{DC}{Dt} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = D \nabla^2 C \quad (3.2)$$

sehingga persamaan untuk volume kontrol diatas dapat dituliskan menjadi

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C) + \frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C) = S(x, y, z) + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$



Gambar 3.12 Diagram proses membangun model estimasi tinggi lapisan pencampuran (*mixing height*)



Gambar 3.13 *Layout* sumber emisi dan volume kontrol dalam pemodelan

dalam kasus tersebut, S terdiri atas C dari sumber lain dan C akibat produksi atau pengurangan dari reaksi kimia pencemar di atmosfer, sehingga:

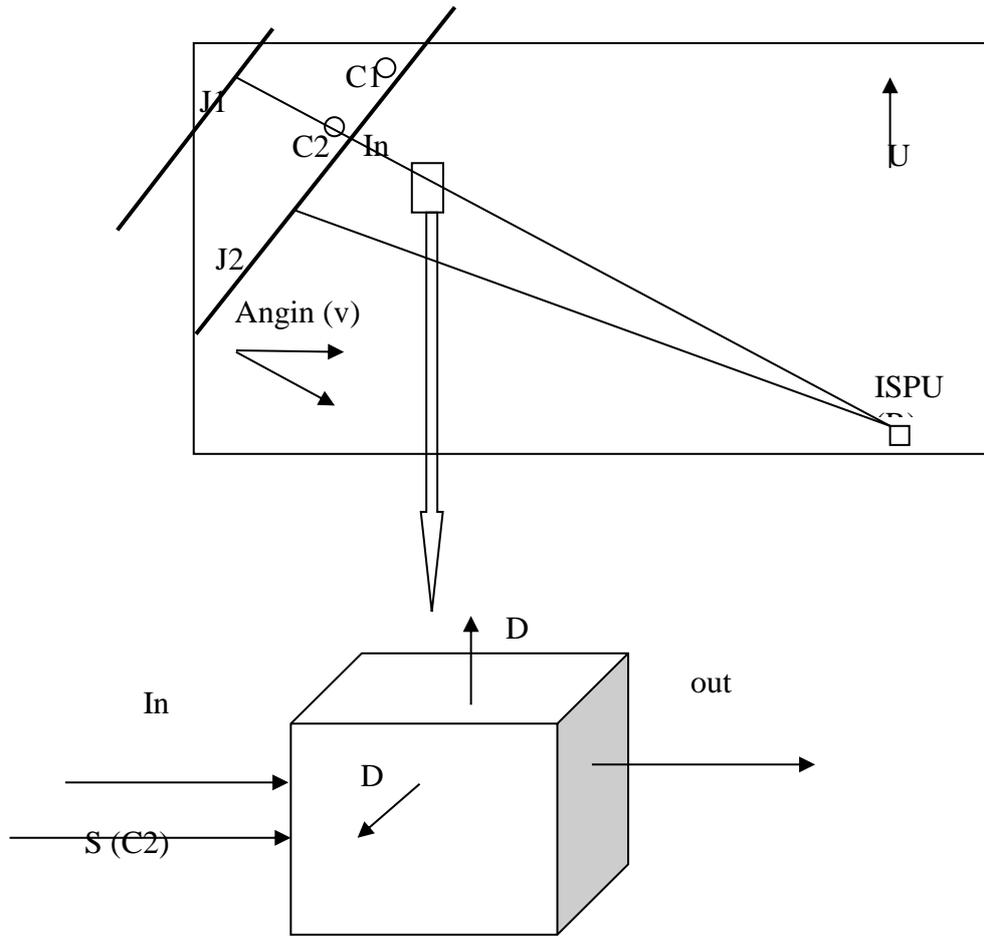
$$S_1(x, y, z) = -DS(C_2) + S_{reaksi} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} DS(C_2) &= \frac{DC_{S_2}}{Dt} = \frac{\partial C_{S_2}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C_{S_2} \\ &= \frac{\partial C_{S_2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_{S_2}) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_{S_2}) + \frac{\partial}{\partial z}(w C_{S_2}) = 0 \end{aligned}$$

Nilai $S_{reaksi} = kC^n$ didapatkan dari perhitungan laju reaksi pencemar. Memasukkan persamaan tersebut maka persamaan untuk model *box control volume* diatas menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{DC}{Dt} &= \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C) + \frac{\partial}{\partial y}(v C) + \frac{\partial}{\partial z}(w C) = -DS(C_2) + \\ &S_{reaksi} + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \\ \frac{DC}{Dt} &= \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C) + \frac{\partial}{\partial y}(v C) + \frac{\partial}{\partial z}(w C) = -\frac{\partial C_{S_2}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}(u C_{S_2}) - \\ &\frac{\partial}{\partial y}(v C_{S_2}) - \frac{\partial}{\partial z}(w C_{S_2}) + kC^n + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3.5) \end{aligned}$$

atau,



Gambar 3.14 *Layout* volume kontrol dalam kesetimbangan massa dan difusi

$$\begin{aligned} \frac{DC}{Dt} &= \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C) + \frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C) + \frac{\partial C_{S2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C_{S2}) + \\ &\frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C_{S2}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C_{S2}) = kC^n + D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

dengan cara yang sama pada *box* yang diinterferensi oleh keempat sumber pencemar maka persamaan tersebut menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{DC}{Dt} &= \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C_{S1}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C_{S1}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C_{S1}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C_{S1}) + \frac{\partial C_{S2}}{\partial t} + \\ &\frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C_{S2}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C_{S2}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C_{S2}) + \frac{\partial C_{L1}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C_{L1}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C_{L1}) + \\ &\frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C_{L1}) + \frac{\partial C_{L2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}C_{L2}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}C_{L2}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mathbf{w}C_{L2}) = kC^n + \\ &D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

faktor untuk $\frac{\partial C_{S1}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC_{S1}) + \frac{\partial}{\partial y}(vC_{S1}) + \frac{\partial}{\partial z}(wC_{S1})$ dan $\frac{\partial C_{S2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC_{S2}) + \frac{\partial}{\partial y}(vC_{S2}) + \frac{\partial}{\partial z}(wC_{S2})$ diselesaikan untuk menjadi model *point source* sedangkan $\frac{\partial C_{L1}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC_{L1}) + \frac{\partial}{\partial y}(vC_{L1}) + \frac{\partial}{\partial z}(wC_{L1})$ dan $\frac{\partial C_{L2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC_{L2}) + \frac{\partial}{\partial y}(vC_{L2})$ diselesaikan dengan model *line source*.

Hasil dari tahapan ini adalah model distribusi pencemar di atmosfer yang dapat digunakan untuk melakukan estimasi persebaran dan konsentrasi pencemar di grid-grid atau kluster yang disusun untuk evaluasi ambien. Secara garis besar langkah-langkah dalam membangun model distribusi pencemar di atmosfer perkotaan dirangkum dalam diagram proses seperti pada Gambar 3.7.

3.3.3.3. Model distribusi pencemar dengan batas volume sampai *mixing height* (kasus perkotaan) dan penentuan kapasitas atmosfer

Secara ringkas proses ini dapat dilihat pada Gambar 3.7. Tahapan ini merupakan penggabungan kedua tahap sebelumnya, dimana distribusi pencemar yang dimodelkan pada tahap kedua akan mengalami refleksi karena terbatas permukaan bawah dan *mixing height* (hasil pemodelan tahap pertama). Dengan demikian, model distribusi ini dibatasi oleh model yang dihasilkan pada tahap satu. Secara umum, asumsi persamaan ini adalah:

$$C_{(x,y,z,t)} = f(Q, h, D_s, K, d) \quad (3.8)$$

Dimana Q adalah beban emisi total, h = *mixing height*, D_s = dispersi dan perpindahan pencemar, K = kinetika kimia pencemar, dan d = disposisi pencemar.

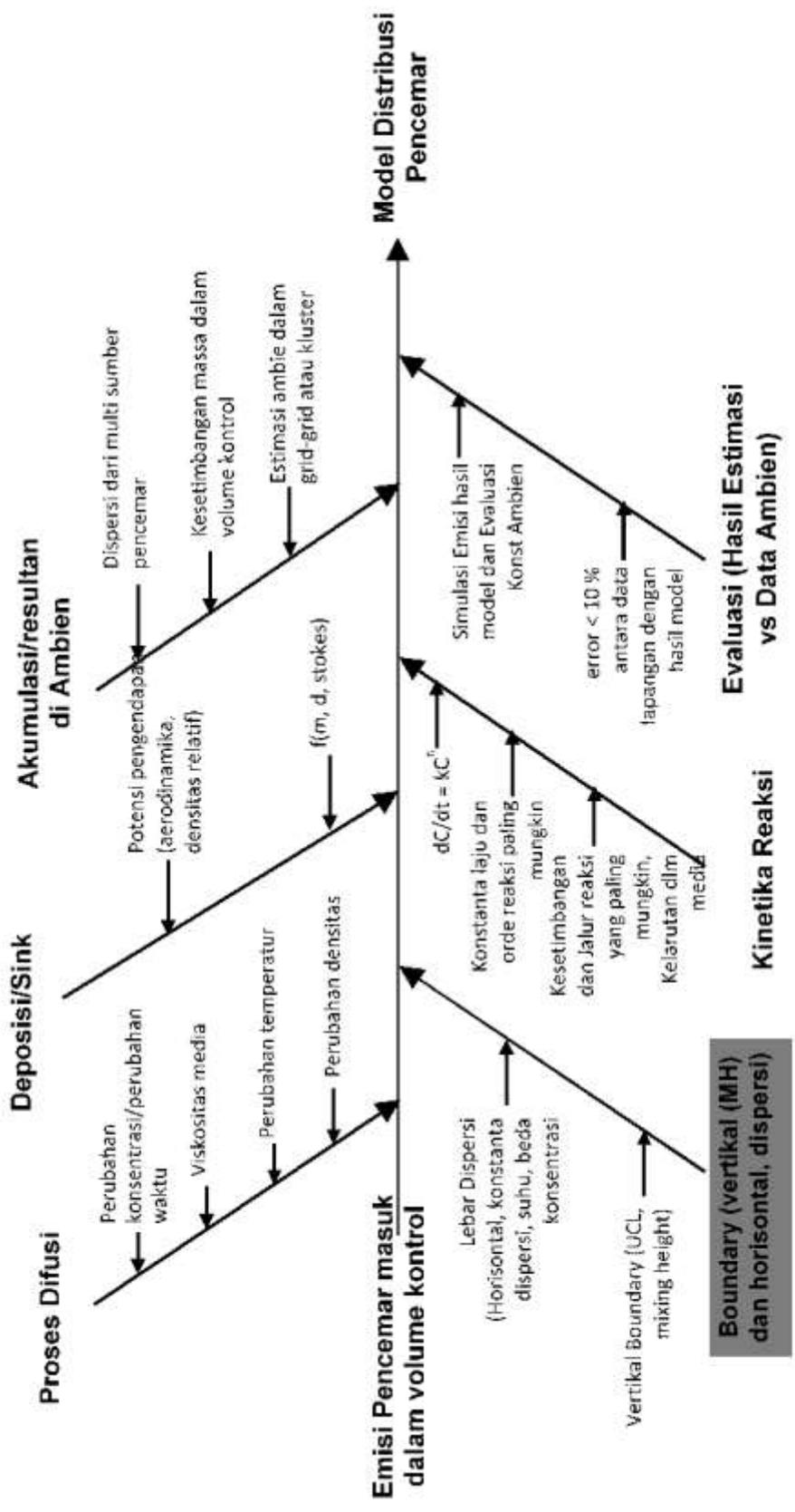
Penentuan koefisien model; Karakteristik perkotaan akan ditentukan dengan nilai-nilai koefisien model yang dijalankan berulang-ulang hingga diperoleh hasil model sesuai dengan (mendekati) kondisi yang sebenarnya. Penyesuaian model dilakukan dengan “*trial dan simpangan*” nilai koefisien model. Hasil dari tahap ini adalah didapatkannya model distribusi pencemar berbasis dispersi dengan modifikasi kinetika.

3.3.4. Verifikasi Model terbangun

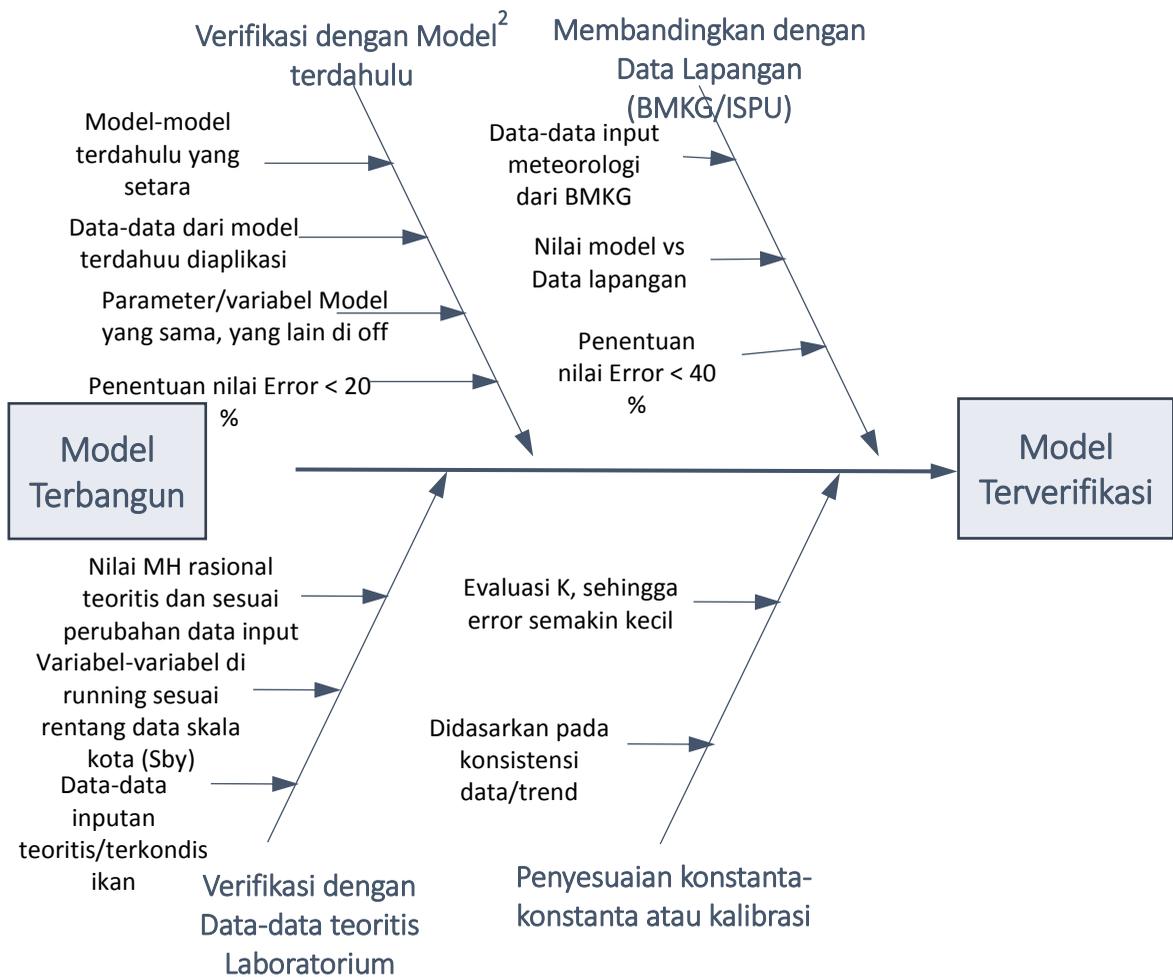
Model yang telah dibangun kemudian diverifikasi dengan model-model lain yang telah ada dari beberapa peneliti dan data-data pemantauan kota Surabaya. Ringkasan proses ini dapat dilihat pada Gambar 3.8. Dalam penelitian ini verifikasi dilakukan dengan tahapan:

- a. Verifikasi model terbangun dengan model-model lain yang telah dipublikasikan. Dalam melakukan proses ini, digunakan parameter-parameter yang setara antara model terbangun dengan model-model lain, digunakan untuk mengestimasi hasil yang relevan. Kemudian dianalisis hasil dari kedua perhitungan tersebut untuk dikaji seberapa besar bias atau simpangan yang dihasilkan. Model terbangun dinyatakan terverifikasi jika simpangan yang dihasilkan dengan model lain kurang atau mendekati standar US-EPA (sub bab 2.8).
- b. Verifikasi dengan data pengukuran ISPU (iklim lokal dan konsentrasi pencemar). Parameter-parameter inputan yang relevan dimasukkan ke dalam model terbangun untuk mengestimasi *mixing height* dan konsentrasi pencemar di ambien kota. Hasil perhitungan ini, yang dilakukan berulang-ulang dengan seri data kota, dibandingkan dengan data estimasi lapisan inversi dan konsentrasi ambien (ISPU) pada kondisi yang relevan. Kedua hasil ini kemudian ditentukan korelasi dan simpangannya. Model terbangun dinyatakan *verified* jika simpangan yang dihasilkan dengan hasil pengukuran lapangan kurang dari atau mendekati standar US-EPA (sub bab 2.8).

Verifikasi model ini dimaksudkan untuk mengukur seberapa dekat, hasil yang dihitung dengan model terbangun/terverifikasi dengan kondisi lapangan yang terukur atau dengan model-model lain yang telah dipublikasi. Makin dekat hasil model dengan data terukur di setiap titik yang dikaji maka semakin baik model ini untuk diaplikasikan. Kedekatan data dengan hasil model ini akan dihitung berdasarkan simpangan/korelasi keduanya.



Gambar 3.15 Diagram proses membangun model distribusi pencemar di perkotaan



Gambar 3.16 Proses verifikasi model terbangun

BAB 4

MEMBANGUN MODEL PROSES DISPERSI DI ATMOSFER PERKOTAAN

Target utama dalam penelitian ini adalah diperolehnya model matematik dan visualisasi dispersi multi sumber pada area perkotaan. Model tersebut menggambarkan proses dispersi pencemar mengikuti variasi pergerakan fluida karena perubahan kondisi atmosfer terhadap waktu. Beberapa langkah dibuat untuk menyederhanakan permasalahan dan memperjelas indikator keberhasilan model. Langkah-langkah ini didasarkan pada metodologi yang disusun pada bab sebelumnya.

Secara prinsip model dispersi pencemar di atmosfer ini dibangun dengan dua tahap utama yaitu:

1. Membangun model estimasi kestabilan atmosfer perkotaan dan tinggi pencampuran, dari model pergerakan fluida sesuai kondisi atmosfer, tahap ini terdiri dari beberapa langkah berikut:

Langkah 1: Mengembangkan model perubahan kondisi dasar atmosfer perkotaan dalam keadaan asumsi statis; menggambarkan perubahan kerapatan molekul, tekanan, dan temperatur dalam variasi elevasi (z) dan variasi radiasi (waktu rotasi bumi). Hasil model ini dijadikan dasar penentuan batas (*boundary*) dispersi pencemar ke arah vertikal (utamanya jika pengembangan model ke arah 3 dimensi). Langkah ini dinyatakan dalam pembahasan 4.1 samapi 4.3.

Langkah 2: Mengembangkan model matematis pergerakan pencemar mengikuti aliran fluida berdasarkan persamaan konservasi zat dan kontinuitas Navier-Stokes. Langkah ini memberikan hasil model dispersi (difusi dan konveksi) pencemar dari satu sumber yang dihubungkan dengan perubahan meteorologi lokal. Langkah ini dinyatakan dalam pembahasan 4.4.

2. Membangun konsep penentuan konstanta yang merepresentasikan kinetika transport dan kinetika reaksi di atmosfer dan kontribusinya pada kualitas udara ambien. Tahap ini terdiri dari

Langkah 3: Mengembangkan model kinetika fotoreaksi pencemar dihubungkan dengan perubahan kondisi atmosfer terutama akibat radiasi dekat permukaan. Langkah ini memberikan gambaran kinetika fotokimia dan pengaruhnya pada konsentrasi pencemar non konservatif di atmosfer. Langkah ini dinyatakan dalam pembahasan 4.5.

3. model distribusi pencemar di perkotaan dengan model pengembangan persamaan dispersi didasarkan atas kesetimbangan massa-energi, kinetika transport dan kinetika reaksi. Tahap ini terdiri dari langkah berikut:

Langkah 4: Menggabungkan model-model tunggal menjadi model majemuk yang menggambarkan dispersi pencemar dari banyak sumber yang memungkinkan dalam wilayah perkotaan. Langkah ini dinyatakan dalam pembahasan 4.6

Langkah 5: Hasil dari langkah 1 – 3, kemudian diuji (diverifikasi) secara akademis dengan membandingkan hasil model dengan parameter inputan terkontrol dengan 1) teori dispersi umum yang mendasari, dan 2) model dispersi umum yang diterapkan seperti model Gauss dengan variasi pergerakan fluida untuk menguji stabilitas dan konsistensi hasil estimasi. Kesimpulannya adalah model dapat dinyatakan terverifikasi atau tidak dengan teori dispersi dan kesesuaian hasil dengan model terdahulu (dianalisis dari nilai korelasi dan simpangan hasil kedua model). Langkah ini dinyatakan dalam pembahasan 4.7.

Langkah 6: Model yang dinyatakan terverifikasi dari langkah 5, diaplikasikan untuk mengestimasi konsentrasi ambien Kota Surabaya. Hasil estimasi ini dibandingkan dengan data pemantauan AQMS Surabaya serta dilakukan evaluasi korelasi dan simpangan. Acuan keterterimaan model mengikuti saran EPA tentang korelasi dan simpangan seperti dinyatakan pada Bab 2 sub bab 2.8. Langkah ini dinyatakan dalam pembahasan 4.10

4.1. Profil Atmosfer dan Radiasi Permukaan dalam Model Pergerakan Fluida Atmosfer

Model pergerakan fluida dipengaruhi banyak faktor penting di atmosfer perkotaan. Faktor-faktor tersebut antara lain variasi konsentrasi molekul gas, variasi tekanan, variasi suhu, variasi energi, angin pada setiap elevasi dan sebagainya.

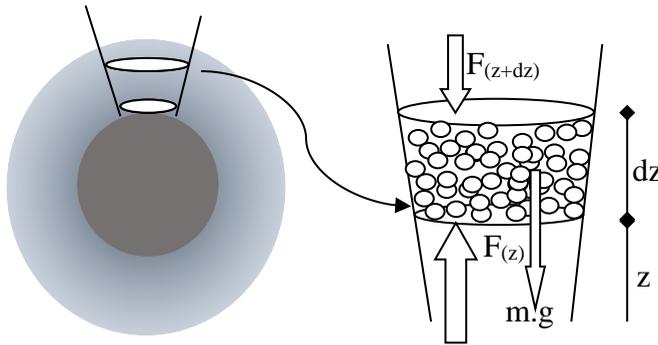
Faktor-faktor ini akan saling mempengaruhi dan secara bersama-sama mempengaruhi pola gerakan fluida atmosfer. Cukup rumit memodelkan aliran fluida atmosfer dengan memperhitungkan faktor-faktor tersebut sekaligus. Sehingga diperlukan tahapan-tahapan untuk membangun *boundary-boundary* dan menyelesaikan pengaruh faktor-faktor tersebut. Dalam penelitian ini dirancang beberapa langkah untuk mempermudah penyelesaian seperti yang dirancang seperti dijelaskan sebelumnya. Langkah-langkah ini dapat merupakan hirarki dan sekaligus *boundary*, dalam memodelkan aliran fluida akibat pengaruh faktor-faktor di atas.

Secara umum prinsip dan fungsi langkah-langkah tersebut adalah:

1. Model kondisi blanko atmosfer perkotaan dengan asumsi tanpa adanya aktifitas, kondisi dataran yang seragam tanpa adanya kekasaran permukaan, dan udara statis (tidak ada angin). Kondisi ini dibuat sebagai asumsi dasar untuk menggambarkan kondisi atmosfer teoritis (profil kerapatan molekul, profil temperatur, profil tekanan dalam berbagai elevasi) sesuai prinsip termodinamika, kesetimbangan gaya, kesetimbangan energi. Kesetimbangan energi mengakomodasi pengaruh radiasi matahari yang bervariasi karena rotasi dan revolusi bumi. Dengan demikian hasil akhir perancangan tahap 1 adalah profil kerapatan molekul, temperatur, dan tekanan pada ordinat elevasi, tergantung waktu.
2. Model aliran molekul-molekul (berdasarkan profil dari tahap 1) karena adanya aliran angin. Beberapa asumsi akan dibuat antara lain arah dan kecepatan angin tetap dan seragam. Dalam aliran fluida atmosfer ini, pencemar dapat mengalami difusi dan konveksi sekaligus. Tahap ini dimodelkan dengan modifikasi formula Navier-Stokes, dan magnetohidrodinamika karena pada dasarnya bumi mempunyai medan magnet di sekitar permukaannya. Pada langkah ini dihasilkan model aliran dan *boundary* yang terbentuk karena antar muka akibat perbedaan kerapatan, suhu, medan magnet, dan kecepatan aliran. Model dalam tahap ini akan menjadi dasar analisis untuk memprediksi tinggi percampuran (*mixing height*), dan *trajectory* dispersi dari sumber pencemar mengikuti pola gerakan fluida atmosfer.

4.1.1. Formulasi Model Perubahan Profil Atmosfer dalam Keadaan Statis

Dalam asumsi kondisi statis, tanpa ada pengaruh pergerakan angin dan radiasi matahari, molekul-molekul gas penyusun atmosfer bertahan pada posisinya karena kesetimbangan yang bekerja kepadanya. Akibat gaya gravitasi bumi dan perubahan tekanan, maka kerapatan atmosfer akan semakin kecil dan ekspansi volume terjadi dengan bertambahnya elevasi. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan prinsip kesetimbangan gaya dan termodinamika.



Gambar 4.1 Kesetimbangan gaya pada molekul gas di atmosfer

Tahap awal diasumsikan suatu volume kontrol untuk membuat model profil atmosfer seperti pada Gambar 4.1. Pada volume kontrol ini, berlaku prinsip kesetimbangan gaya yang mempertahankan molekul-molekul di dalamnya tetap pada posisinya. Resultan gaya yang bekerja pada volume kontrol tersebut adalah nol. Gaya apung udara (selisih gaya tekan ke atas dan ke bawah) berkesetimbangan dengan gaya berat karena gravitasi. Dengan mengambil $F=P.A$ dan $m=\rho.V$, kesetimbangan gaya pada molekul gas di atmosfer dapat dituliskan:

$$F_{(z)} - F_{(z+dz)} - m.g = 0$$

$$P_{(z)}A - P_{(z+dz)}(A + dA) = \rho g V \quad (4.1)$$

Secara matematis $V = 0,5(2A+dA)dz$, dengan mengambil $dz \rightarrow 0$ maka dA diasumsikan nol, sehingga:

$$P_{(z)}A - P_{(z+dz)}A = \rho g A dz; \quad dz \rightarrow 0;$$

$$P_{(z)} - P_{(z+dz)} = \rho g dz$$

$$-dP = \rho g dz \quad \Rightarrow \quad \frac{-dP}{dz} = \rho g$$

Dihubungkan dengan rumusan densitas dan berat molekul, $\rho = nM/V$ maka persamaan di atas dapat ditulis menjadi (lihat juga persamaan 2.23):

$$\frac{-dP}{dz} = \rho g = \frac{nM}{V} g \quad (4.2)$$

Dengan mensubstitusi $n/V=P/(RT)$ ke persamaan 4.2, maka selanjutnya dapat diperoleh penyelesaian persamaan tersebut, yaitu:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dz} &= -\frac{n}{V} Mg = -\frac{P}{RT} Mg \Rightarrow \frac{dP}{P} = -\frac{Mg}{RT} dz \\ \int_0^z \frac{dP}{P} &= -\frac{Mg}{RT} \int_0^z dz \Rightarrow \ln P|_0^z = -\frac{Mg}{RT} z|_0^z \\ \ln P_z - \ln P_0 &= -\frac{Mg}{RT} (z - 0) \Rightarrow P_z = P_0 e^{-\frac{Mg}{RT}z} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dalam pernyataan keadaan termodinamika adiabatik untuk asumsi gas ideal, diperoleh perubahan temperatur karena perubahan elevasi, seperti pada persamaan 2.22, maka mengalikan persamaan tersebut ke persamaan 4.2 diperoleh:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{dT}{dP} \frac{dP}{dz} = \frac{V}{nC_p} \left(-\frac{nM}{V} g \right) = -\frac{M}{C_p} g \quad (4.4)$$

$$\int_0^z dT = -\frac{M}{C_p} g \int_0^z dz \Rightarrow T_z - T_0 = -\frac{M}{C_p} g (z - 0)$$

$$T_z = T_0 - \frac{M}{C_p} g z \quad (4.5)$$

Modifikasi turunan pertama dari persamaan keadaan gas ideal (persamaan 2.18) adalah:

$$\begin{aligned} PdV + VdP &= nRdT \Rightarrow P \frac{dV}{dT} + V \frac{dP}{dT} = nR \\ P \frac{dV}{dT} + V \frac{nC_p}{V} &= nR \Rightarrow \frac{dV}{dT} = \frac{n(R-C_p)}{P} \\ \frac{dV}{dz} = \frac{dV}{dT} \frac{dT}{dz} &= \frac{n(R-C_p)}{P} \left(-\frac{M}{C_p} g \right) = -n \frac{C_v}{C_p} \frac{M}{P} g \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\frac{n}{P} = \frac{V}{RT} \Rightarrow \frac{dV}{dz} = -\frac{C_v}{C_p} Mg \left(\frac{V}{RT} \right)$$

$$\int_0^z \frac{dV}{V} = -\frac{C_v}{C_p} \frac{Mg}{RT} \int_0^z dz \Rightarrow \ln V|_0^z = -\frac{C_v}{C_p} \frac{Mg}{RT} z|_0^z$$

$$\ln \frac{V_z}{V_0} = -\frac{C_v}{C_p} \frac{Mg}{RT} |z - 0| \Rightarrow \frac{V_z}{V_0} = e^{-\frac{C_v}{C_p} \frac{Mg}{RT} z}$$

$$V_z = V_0 e^{-\frac{C_v}{C_p} \frac{Mg}{RT} z} \quad (4.7)$$

Secara prinsip kerapatan atau densitas akan setara dengan konsentrasi (jumlah zat per volume tertentu), sehingga semakin ke atas, konsentrasi udara (zat penyusun atmosfer) juga semakin kecil. Dengan menggunakan prinsip dalam persamaan gas ideal, dapat dihitung perubahan konsentrasi udara di atmosfer adalah:

$$\frac{P}{RT} = \frac{n}{V} = C \quad (4.8)$$

Sedangkan perubahan konsentrasi udara sebagai fungsi perubahan *altitude*, dengan asumsi tidak ada perubahan kuantitas molekul gas pada volume kontrol ketika elevasinya berubah, maka:

$$C_z = \frac{n}{V_z} = \frac{P_z}{RT_z} \Rightarrow C_z - C_0 = \frac{n}{V_z} - \frac{n}{V_0} = \frac{P_z}{RT_z} - \frac{P_0}{RT_0} \quad (4.9)$$

$$\rho_z = \frac{nM}{V_z} = \frac{MP_z}{RT_z} = MC_z \Rightarrow \rho_z - \rho_0 = \frac{nM}{V_z} - \frac{nM}{V_0} = \frac{MP_z}{RT_z} - \frac{MP_0}{RT_0}$$

Pada perhitungan yang cukup teliti, besar gaya gravitasi akan berkurang dengan bertambahnya elevasi. Elevasi akan menambahkan jarak pengaruh molekul gas dari pusat massa bumi (Sportisse 2010).

$$g_z = g_0 \left(\frac{R_t}{R_t+z} \right)^2 \quad (4.10)$$

Tabel 4.1 Data Standar Atmosfer pada elevasi $z=0$ (permukaan)

Parameter	Lambang	Nilai	Unit	Nilai	Unit
Tekanan	P_o	101325	N/m ²	1013,25	hPa
Temperatur (Sby)	T_o	299,70*)	K	26,5	°C
Temp. Rata-rata (Int)	T_o	288,15	K	15	°C
Densitas	ρ_0	1,225	kg/m ³		
Gravitasi	g_o	9,810	m/s ²		
Kapasitas Panas (P_{fix})	C_p	29,000	J/K.mol	1004	J/K.kg
Kapasitas Panas (V_{fix})	C_v	5/2 nR	J/K.mol		J/K.kg
Konstanta Gas	R	8,314	J/mol.K	8,314	$\frac{kg.m^2}{s^2.mol.K}$
Berat Molekul	M_D	0,028961*)	kg/mol	28,96	kg/mol
	M_W	0,029681*)	kg/mol	29,68	kg/mol

*) Hasil perhitungan atau diolah dari data BLH dan BMKG

Persamaan-persamaan yang diperoleh di atas kemudian digunakan untuk mengestimasi profil tekanan, temperatur, konsentrasi, dan densitas dalam variasi ketinggian. Untuk keperluan tersebut beberapa data awal diambil dari berbagai sumber sebagai standar atau referensi untuk estimasi dan perbandingan. Data-data awal referensi perhitungan adalah data standar atau hasil pengukuran pada elevasi nol (permukaan), ditampilkan pada Tabel 4.1.

4.1.1.1. Profil Temperatur dan Tekanan Adiabatik

Estimasi profil temperatur dan tekanan atmosfer pada berbagai elevasi dihitung menggunakan persamaan 4.3, persamaan 4.5, dan persamaan 4.10. Menggunakan nilai-nilai referensi dari Tabel 4.1, hasil perhitungan dan perbandingan dengan ISA maupun data BMKG untuk Kota Surabaya dapat dilihat pada Tabel 4.2. Contoh perhitungan temperatur dan tekanan untuk salah satu elevasi dapat dilihat pada ringkasan berikut:

1. Temperatur pada elevasi 100 m; dengan $T_0 = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C} = 299,7 \text{ K}$; $M_D = 0,028961 \text{ kg/mol}$; $C_p = 29 \text{ J/K.mol}$; $g_0 = 9,81 \text{ m/s}^2$

Pada ketinggian ini, gravitasi yang bekerja pada molekul-molekul gas adalah:

$$g_z = g_0 \left(\frac{R_t}{R_t+z} \right)^2 = 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \left(\frac{6400000 \text{ m}}{(6400000+100)m} \right)^2 = 9,80969 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

Dengan demikian, temperatur pada ketinggian 100 m (T_{100}) sesuai persamaan 4.5 adalah ($1 \text{ joule} = 1 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$):

$$T_z = T_0 - \frac{M}{C_p} g_z = 299,7 \text{ (K)} - \frac{0,028961 \left(\frac{kg}{mol} \right)}{29 \left(\frac{J(=kgm^2/s^2)}{K.mol} \right)} \times 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right) \times 100(m)$$

$$T_z = 299,7 \text{ (K)} - 0,98 \text{ (K)} = 298,72 \text{ K}$$

Tekanan pada elevasi 100 m; seperti pada penghitungan temperatur di atas, dan dengan mengambil nilai $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$, dan $P_0 = 1013 \text{ hPa}$, $T = T_{100}$

$$P_z = P_0 e^{-\frac{Mg_z}{RT}} = 1013(\text{hPa}) \times e^{-\frac{0,028961 \left(\frac{kg}{mol} \right) 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right)}{8,314 \left(\frac{J}{K.mol} \right) 298,72 \text{ (K)}} \times 100(m)}$$

$$= 1013(\text{hPa}) \times e^{-0,0114} = 1013(\text{hPa}) \times 0,98866 = 1001,66 \text{ (hPa)}$$

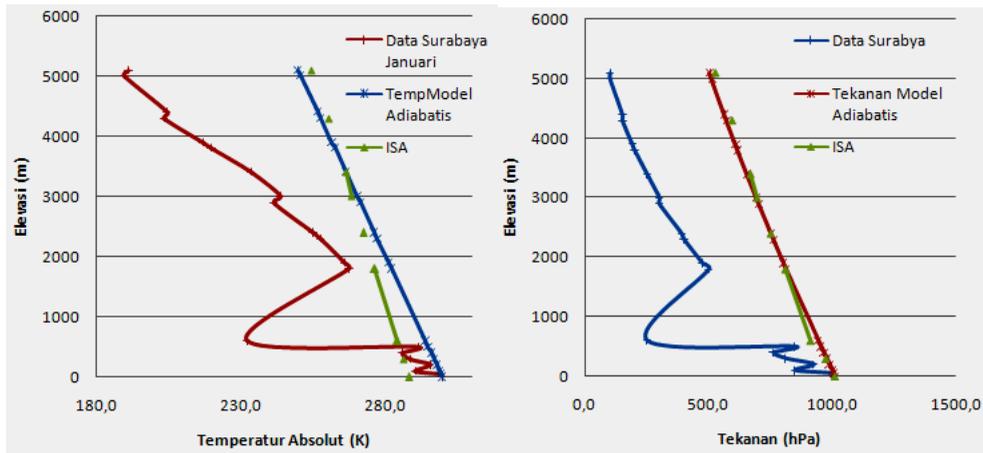
Hasil perhitungan untuk elevasi yang lain disesuaikan dengan elevasi perekaman data temperatur dan tekanan atmosfer BMKG, dapat dilihat pada Tabel 4.2. Sebagai acuan dalam menguji model yang dihasilkan, maka ditambahkan data riil pengukuran temperatur dan tekanan di atmosfer Surabaya dan data *International Standard Atmosfer* (ISA). Dalam asumsi adiabatik, maka perhitungan model harus mendekati nilai ISA. Dan ketika dimasukkan parameter-parameter meteorologi riil, maka hasil perhitungan model harus mendekati nilai data pengukuran riil.

Tabel 4.2 Perbandingan hasil model temperatur dan tekanan atmosfer dengan data *International Standard Atmosphere* (ISA) dan data rata-rata untuk Surabaya

Elevasi (m)	Gravitasi (m/s ²)	Temperatur (K)			Tekanan (hPa)		
		Model Adiabatis	ISA	Data Sby	Model Adiabatis	ISA	Data Sby
0	9,81	299,70			1013,3		
5100	9,79	249,82	254,5	191,4	504,9	527,0	100,0
5000	9,79	250,79		189,9	513,2		100,0

Elevasi (m)	Gravitasi (m/s ²)	Temperatur (K)			Tekanan (hPa)		
		Model Adiabatis	ISA	Data Sby	Model Adiabatis	ISA	Data Sby
4400	9,80	256,65		204,6	564,5		150,0
4300	9,80	257,63	260,5	203,5	573,2	595,0	150,0
3900	9,80	261,54		217,0	609,1		190,0
3800	9,80	262,52		219,9	618,2		200,0
3400	9,80	266,43	266,4	233,5	655,4	670,0	250,0
3000	9,80	270,34	268,4	243,7	693,7	697,0	300,0
2900	9,80	271,31		241,6	703,4		300,0
2400	9,80	276,20	272,4	255,0	753,1	753,0	390,0
2300	9,80	277,18		257,7	763,2		400,0
1900	9,80	281,10		265,9	804,4		475,0
1800	9,80	282,08	276,3	267,5	814,8	812,0	500,0
600	9,81	293,82	284,2	232,2	945,0	914,0	250,0
500	9,81	294,80		291,5	956,2		850,0
400	9,81	295,78		285,7	967,5		762,5
300	9,81	296,76	286,2	288,7	978,8	977,0	812,5
200	9,81	297,74		295,4	990,3		925,0
100	9,81	298,72		290,4	1001,7		850,0
50	9,81	299,21		298,9	1007,5		1000,0
0	9,81	299,70	288,2	299,7	1013,3	1013,0	1007,5

Ringkasan dari nilai-nilai dalam Tabel 4.2 dituangkan dalam grafik pada Gambar 4.2. Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara data temperatur dan tekanan atmosfer Surabaya dengan hasil estimasi model maupun data *International Standard Atmosfer* (ISA). Tampak pada data Surabaya, profil temperatur dan tekanan, tidak sepenuhnya berpola linear (temperatur) atau logaritmik (tekanan) seperti pada model adiabatik atau data ISA. Data rata-rata di Surabaya menunjukkan adanya penurunan temperatur dan tekanan pada ketinggian 100 sampai 600 m (lihat juga Tabel 4.2 dan Gambar 4.2), dan data lainnya berpola sama dengan model adiabatik maupun data ISA, dengan gradien yang berbeda.



Gambar 4.2 Perbandingan profil temperatur dan tekanan model adiabatik, data rata-rata Surabaya, dan ISA

Bentuk pola profil temperatur dan tekanan pada Gambar 4.2 dapat dijadikan petunjuk adanya perubahan kerapatan udara pada ketinggian tertentu. Sehingga perlu dilanjutkan analisis terbentuknya layer pada atmosfer. Perbedaan profil data dan hasil model adiabatik menunjukkan perlunya memasukkan parameter-parameter lainnya (radiasi energi, angin, kelembaban, pelepasan energi dari terrain/permukaan, dan lain-lain) ke dalam model adiabatik yang telah disusun di atas.

Profil hasil perhitungan model disisi lain cukup dekat dengan profil data ISA. Maka model yang dibuat diatas secara teori mendekati model adiabatik rata-rata profil atmosfer global. Dengan demikian model adiabatik yang dihasilkan tersebut dapat dijadikan acuan analisis atmosfer lebih lanjut terutama ketika diperlukan kondisi-kondisi pembandingan adiabatik.

4.1.1.2. Profil Konsentrasi, Densitas, dan Volume Molar Keadaan Statis

Estimasi profil distribusi konsentrasi, densitas, dan volume molar atmosfer pada berbagai elevasi dihitung berdasarkan profil temperatur dan tekanan. Perhitungan estimasi tersebut menggunakan persamaan 4.3, persamaan 4.5, dan persamaan 4.10. dan nilai-nilai referensi dari Tabel 4.1, hasil perhitungan dan perbandingan dengan ISA maupun data rata-rata. Contoh perhitungan konsentrasi, densitas, dan volume molar (perhitungan untuk 1 mol udara) untuk salah satu elevasi dapat dilihat pada ringkasan berikut:

1. Konsentrasi udara campuran pada elevasi 100; dan dari Tabel 4.3 diperoleh $P_{100} = 1001,7 \text{ hPa} = 1001,7 \text{ hN/m}^2 = 100170 \text{ kg/m.s}^2$,

$$C_{100} = \frac{n}{V_{100}} = \frac{P_{100}}{RT_{100}} = \frac{100170 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2}\right)}{8,314 \left(\frac{\text{kg.m}^2}{\text{s}^2 \text{mol.K}}\right) 298,72 (\text{K})} = 40,33 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

2. Densitas udara pada elevasi 100, diperoleh dengan mengalikan konsentrasi pada elevasi yang sama dengan berat molekul udara rata-rata $M = 0,028961 \text{ kg/mol}$ (Tabel 4.2),

$$\rho_z = \frac{MP_z}{RT_z} = MC_z = 0,028961 \left(\frac{\text{kg}}{\text{mol}}\right) \times 40,33 \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right) = 1,1681 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3. Volume molar pada elevasi 100 adalah satu per konsentrasi pada elevasi yang sama (hasil lengkap untuk elevasi lain ditampilkan pada Tabel 4.3) :

$$\frac{V_{100}}{\text{mol}} = \frac{1 \text{ mol}}{C_{100}} = \frac{1 \text{ mol}}{40,33 \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)} = 0,0248 \text{ m}^3$$

Tabel 4.3 Hasil Estimasi Konsentrasi, Densitas, dan Volume Molar Atmosfer

Elevasi (z) m	Model Adiabatis				
	T (K)	P(hPa)	C (mol/m ³)	ρ (kg/m ³)	V (m ³ /mol)
0	299,70	1013,3	40,7	1,18	0,025
5100	249,82	504,9	24,3	0,70	0,041
5000	250,79	513,2	24,6	0,71	0,041
4400	256,65	564,5	26,5	0,77	0,038
4300	257,63	573,2	26,8	0,78	0,037
3900	261,54	609,1	28,0	0,81	0,036
3800	262,52	618,2	28,3	0,82	0,035
3400	266,43	655,4	29,6	0,86	0,034
3000	270,34	693,7	30,9	0,89	0,032
2900	271,31	703,4	31,2	0,90	0,032
2400	276,20	753,1	32,8	0,95	0,030
2300	277,18	763,2	33,1	0,96	0,030
1900	281,10	804,4	34,4	1,00	0,029
1800	282,08	814,8	34,7	1,01	0,029
600	293,82	945,0	38,7	1,12	0,026
500	294,80	956,2	39,0	1,13	0,026
400	295,78	967,5	39,3	1,14	0,025
300	296,76	978,8	39,7	1,15	0,025
200	297,74	990,3	40,0	1,16	0,025
100	298,72	1001,7	40,3	1,17	0,025
50	299,21	1007,5	40,5	1,17	0,025

Data hasil perhitungan pada Tabel 4.3 selanjutnya digunakan untuk dasar visualisasi model distribusi molekul gas di atmosfer pada berbagai level elevasi. Nampak bahwa profil konsentrasi dan densitas gas-gas campuran di atmosfer semakin kecil dengan bertambahnya elevasi. Hal ini juga menjadi alasan adanya dispersi ke arah vertikal.

4.1.2. Formulasi Model Profil Atmosfer dengan Variabel Energi Radiasi

Atmosfer bumi secara terus menerus menerima energi radiasi dari matahari. Rotasi bumi menyebabkan radiasi diterima kira-kira separoh permukaan bumi (berkesetimbangan dengan pelepasan energi kembali yang tidak diserap ke atmosfer bumi), bergantian dengan separoh bagian yang lain melepaskan sisa radiasi saat tidak menerima radiasi. Bagian-bagian ini bergantian terus menerus dalam siklus dengan berkesetimbangan.

Jika diambil dalam satu tempat dengan latitute tertentu sebagai acuan, maka seolah-olah radiasi matahari diterima tempat tersebut hanya sepanjang siang, dengan intensitas nol (saat terbit) kemudian menjadi maksimum (saat zenith) dan kembali nol (saat tenggelam). Kekuatan radiasi ini dipengaruhi sudut radiasi yang dihitung dari sudut zenith matahari (diukur dari posisi matahari saat tegak lurus dari permukaan bumi, siang hari), sudut jam, sudut deklinasi, dan jarak matahari ke bumi. Acuan perhitungan dalam penelitian ini adalah hasil analisis matematis dan persamaan-persamaan teoritis, antara lain:

1. Sudut zenith (θ_0) dihitung dari posisi matahari tegak lurus ke bidang penerima datar di bumi. Sehingga saat terbit dan tenggelam sudut zenith matahari adalah nol.

$$\cos \theta_0 = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \sin h \quad (4.11)$$

λ adalah *latitude*, δ deklinasi matahari, dan h adalah sudut jam (lihat persamaan 2.2)

2. Sudut-jam matahari (h), mulai dari 0 saat terbit dan 180 saat tenggelam, dengan rata-rata bertambah 15 derajat perjam pada garis lintang yang selalu tegak lurus dengan posisi matahari. Garis lintang lain bisa berbeda tergantung waktu terbit dan tenggelam matahari.

$$\Delta h = \frac{180}{t_{sg}} = \frac{180}{(t_{tg} - t_{tb})}$$

$$h = t_h * \Delta h \quad (4.12)$$

t_{sg} adalah panjang waktu siang hari, waktu tenggelam matahari (t_{tg}) – waktu terbitnya (t_{tb}), dan t_h adalah umur siang dihitung mulai waktu terbit matahari.

- Sudut deklinasi matahari (δ), dalam rata-rata data astronomi diketahui deklinasi matahari berada diantara $23^0 27'$ (21 Juni) sampai $-23^0 27'$ (22 Desember).

$$\delta = 23,45 * \sin \left(360 * \frac{n-81}{365} \right) \quad (4.13)$$

Dengan n = hari ke- n dalam setahun, seperti contoh 1 Januari adalah hari ke-1 ($n=1$), 1 Pebruari adalah hari ke-32 ($n=32$), dan seterusnya.

- Jarak matahari ke bumi dinyatakan dalam perbandingan d_m/d yaitu jarak estimasi sesuai waktu dengan jarak rata-rata tahunan matahari ke bumi (1 astronomi). Nilai $(d_m/d)^2$ berada dalam rentang 1,0343 (3 Januari) sampai 0,9674 (5 Juli).

$$\left(\frac{d_m}{d} \right)^2 = 1 + 0,033 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \quad (4.14)$$

Kuat radiasi (S_0) matahari ke bumi dihitung dengan:

$$S_0 = S \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \cos \theta_0 \quad (4.15)$$

S_0 adalah intensitas radiasi yang diterima permukaan datar di bumi yang hanya dipengaruhi oleh jarak matahari-bumi dan sudut zenith matahari.

Menggunakan acuan-acuan tersebut dan persamaan-persamaan pada sub bab 2.1, model perubahan intensitas radiasi yang diterima permukaan di Surabaya dapat diestimasi seperti berikut:

Data geoposisi Kota Surabaya, diambil satu titik yang mewakili:

Latitude (λ) = -7,23 atau 7,23 LS

Longitude = 112,74 atau 112,74 BT

Altitude rata-rata = 5-10 m

Intensitas Radiasi Standar Matahari Global (S) = 1367 W/m²

Waktu Global : +7 UTC atau GMT +7

Contoh perhitungan untuk model perubahan intensitas radiasi yang diterima kota Surabaya pada tanggal 1 Januari 2010, siang hari.

- Jarak matahari ke bumi pada tanggal tersebut, 1 Januari maka $n = 1$

$$\left(\frac{d_m}{d}\right)^2 = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360*n}{365}\right)$$

$$= 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360*1}{365}\right) = 1,033$$

2. Deklinasi matahari (δ), pada $n = 1$

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{n-81}{365}\right)$$

$$= 23,45 * \sin\left(360 * \frac{1-81}{365}\right) = 23,45 * \sin(-78,904) = -22,847$$

Jadi pada tanggal tersebut posisi deklinasi matahari (δ) = $22,847 = 22^0$
 $(0,847*60)'' = 22^0 51''$

3. Sudut jam matahari, pada saat zenith $h = 90$, terbit $h = 0$, dan tenggelam $h = 180$
 Pada tanggal 1 Januari 2010, waktu meridian (saat matahari berada pada zenith = 90^0) adalah 11:32:35 WIB, waktu terbit adalah 05:16:42 dan waktu tenggelam 17:48:29

$$\Delta h = \frac{180}{t_{sg}} = \frac{180}{(t_{tg}-t_{tb})} = \frac{180}{17:48-5:16} = 14,37/jam$$

Sudut jam matahari (h) pada waktu ke waktu, misal jam 07:00:00 adalah

$$h = t_h * \Delta h$$

$$t_h = 07:00:00 - 05:16:42 = 1:43:18$$

$$h = (1:43:18) * 14,37 = 24,7 = 24^0 42''$$

Untuk waktu-waktu yang lain, dihitung dengan cara yang sama.

4. Sudut zenith (θ_0), sesuai dengan sudut jam matahari. Sesuai data *latitute* (λ), perhitungan (bisa juga dengan data pengukuran) deklinasi matahari (δ) dan sudut jam matahari (h), dapat dihitung nilai sudut zenith matahari pada pukul 07:00:00 adalah:

$$\cos \theta_0 = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \sin h$$

$$\cos \theta_0 = \sin(-7,23) \sin(22,847) + \cos(-7,23) \cos(22,847) \sin(24,7)$$

$$\cos \theta_0 = 0,43 \Rightarrow \theta_0 = 64,5^0 = 64^0 30''$$

5. Kuat radiasi (S_0) teroritis

$$S_0 = S \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \cos \theta_0$$

$$S_0 = 1367 \frac{W}{m^2} \times 1,033 \times 0,43 = 608,95 \frac{W}{m^2}$$

6. Koreksi intensitas radiasi (S_s) teroris karena lintasan radiasi pada perbedaan ketebalan atmosfer rata-rata sesuai sudut zenith matahari. Koreksi ini didasarkan pada estimasi massa udara yang dilintasi berkas radiasi, yaitu:

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h} \right)^2} = \sqrt{1 + (\tan^{-1} \theta_0)^2} \quad (4.16)$$

$$AM = \sqrt{1 + (\tan^{-1} 64,30)^2} = 2,32$$

Sehingga intensitas radiasi terkoreksi akan berbanding terbalik dengan massa udara yang dilintasi berkas radiasi. Radiasi yang diterima atau terukur di permukaan bumi adalah energi radiasi yang tersisa setelah menembus masa udara. Nilai radiasi yang diterima permukaan (S_s) dapat diestimasi secara matematis dengan pendekatan:

1. Radiasi permukaan (S_s) akan berbanding lurus dengan radiasi permukaan horisontal (*possible radiation*) yaitu S_0
2. Radiasi permukaan (S_s) akan berbanding terbalik dengan ketebalan massa udara (AM). Semakin tebal massa udara yang dilewati, maka radiasi yang diterima permukaan semakin kecil dan sebaliknya, dengan demikian:

$$S_s \sim \frac{S_0}{AM}; \quad S_s = k \frac{S_0}{AM} \quad (4.17)$$

Nilai k merupakan konstanta atmosfer yang menyatakan adanya matriks dalam atmosfer yang mempengaruhi besar intensitas yang menembusnya. Matriks tersebut antara lain: proses hamburan, pantulan, dan serapan oleh molekul-molekul gas di atmosfer, adanya tutupan mendung, dan zat pencemar lain yang ada di atmosfer. Nilai k ini akan diperkirakan dengan analisis data pengukuran intensitas radiasi tahunan pada permukaan yang ada di Kota Surabaya. Jika nilai k diasumsikan sama dengan c ($c > 0$ sebagai bilangan riil 1, 2, 3, dst, dengan membuat asumsi matriks di atmosfer selalu seragam) maka nilai intensitas radiasi permukaan (S_s) terkoreksi, dihitung sebagai berikut (untuk $k=1$):

$$S_s = 1 \times \frac{608,95 \frac{W}{m^2}}{2,32} = 263 \frac{W}{m^2}$$

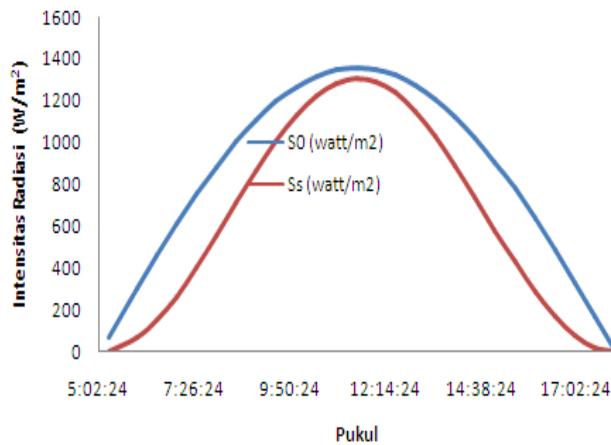
Hasil perhitungan pada waktu yang lain pada hari yang sama dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.3. Nilai k ini akan dikoreksi kembali setelah hasil estimasi model awal dari perhitungan ini dievaluasi dan dibandingkan dengan data-data pengukuran intensitas radiasi yang dilakukan di beberapa titik di Kota Surabaya. Titik-titik dan data-data pengukuran intensitas radiasi ini akan dianalisis untuk menentukan data-data yang dianggap dapat memenuhi sifat intensitas radiasi yang layak diperbandingkan. Beberapa asumsi akan dikembangkan untuk menganalisis sifat data, seperti potensi tutupan mendung, potensi pencemar yang mengurangi transparansi atmosfer, dan potensi adanya scattering atau hamburan cahaya yang mempengaruhi pembacaan alat ukur intensitas radiasi.

Tabel 4.4 Parameter dalam perhitungan perubahan intensitas radiasi matahari bidang datar permukaan

Waktu		Keterangan Posisi Penerima Radiasi			
sunset	17:48:29	latitute (λ)	-7,23	Kota	Surabaya
sunrise	5:16:42	deklinasi (δ)	-22,8427	GMT	+7
waktu siang	12:31:47	S	1367	W/m ²	Longitute 112,74
Tanggal	01/01/2010	Hari ke	1	altitute	10 m

Tabel 4.5 Perhitungan perubahan intensitas radiasi matahari bidang datar permukaan

Jam	t_h (jam)	$h(^{\circ})$	$\theta (^{\circ})$	$(dm/d)^2$	S_0 (watt/m ²)	(AM)	S_s (watt/m ²)
5:16:42	0:00:00	0,0	87,2	1,033	69	20,35	3
6:00:00	0:43:18	10,4	77,7	1,033	301	4,68	64
6:30:00	1:13:18	17,5	71,1	1,033	458	3,08	149
7:00:00	1:43:18	24,7	64,5	1,033	609	2,32	263
7:30:00	2:13:18	31,9	57,9	1,033	751	1,88	400
8:00:00	2:43:18	39,1	51,3	1,033	883	1,60	552
8:30:00	3:13:18	46,3	44,8	1,033	1001	1,41	710
9:00:00	3:43:18	53,5	38,5	1,033	1106	1,28	866
9:30:00	4:13:18	60,6	32,3	1,033	1193	1,18	1009
10:00:00	4:43:18	67,8	26,5	1,033	1264	1,12	1131
10:30:00	5:13:18	75,0	21,4	1,033	1315	1,07	1225
11:00:00	5:43:18	82,2	17,5	1,033	1347	1,05	1285
11:32:35	6:15:53	90,0	15,8	1,033	1359	1,04	1308
12:00:00	6:43:18	96,6	17,0	1,033	1351	1,05	1292
12:30:00	7:13:18	103,7	20,6	1,033	1322	1,07	1238
13:00:00	7:43:18	110,9	25,6	1,033	1274	1,11	1149
13:30:00	8:13:18	118,1	31,3	1,033	1207	1,17	1032
14:00:00	8:43:18	125,3	37,4	1,033	1122	1,26	891
14:30:00	9:13:18	132,5	43,7	1,033	1021	1,38	738
15:00:00	9:43:18	139,7	50,2	1,033	904	1,56	579
15:30:00	10:13:18	146,8	56,7	1,033	775	1,82	425
16:00:00	10:43:18	154,0	63,3	1,033	634	2,23	285
16:30:00	11:13:18	161,2	69,9	1,033	485	2,91	166
17:00:00	11:43:18	168,4	76,5	1,033	329	4,29	77
17:30:00	12:13:18	175,6	83,1	1,033	169	8,36	20
18:00:00	12:43:18	182,8	89,7	1,033	7	192,43	0



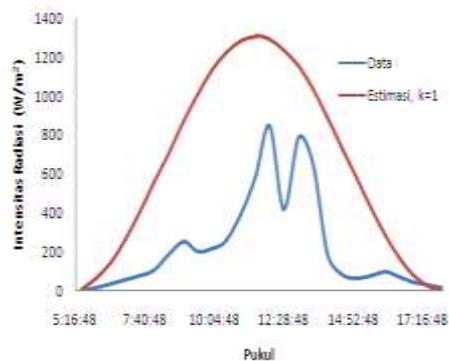
Gambar 4.3 Perubahan waktu, intensitas radiasi (S_0), radiasi permukaan (S_s) dihasilkan oleh model awal

4.1.2.1. Estimasi Kuat Radiasi dan Data Pengukuran Radiasi Permukaan di Surabaya dalam Satu Tahun

Secara prinsip radiasi global dipengaruhi oleh peredaran matahari dan berubahannya setiap saat. Perubahan sudut deklinasi dan azimuth matahari sangat menentukan besaran intensitas radiasi yang diterima permukaan datar di muka bumi. Pola perubahan sudut deklinasi dan azimuth matahari ini, berbeda pada setiap daerah dengan posisi latitud dan waktu yang berbeda. Data pengukuran radiasi global dan hasil estimasinya untuk Kota Surabaya dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.4 berikut:

Tabel 4.6 Perbandingan data pengukuran dengan model awal

Jam	pengukuran (W/m^2)	Estimasi ($k=1$); w/m^2
5:30:00	1	3
6:00:00	15,5	64
6:30:00	34,9	149
7:00:00	58,4	263
7:30:00	75	400
8:00:00	104	552
8:30:00	186	710
9:00:00	251	866
9:30:00	201	1009
10:00:00	215	1131
10:30:00	254	1225
11:00:00	396	1285
11:30:00	581	1308
12:00:00	849	1292
12:30:00	419	1238

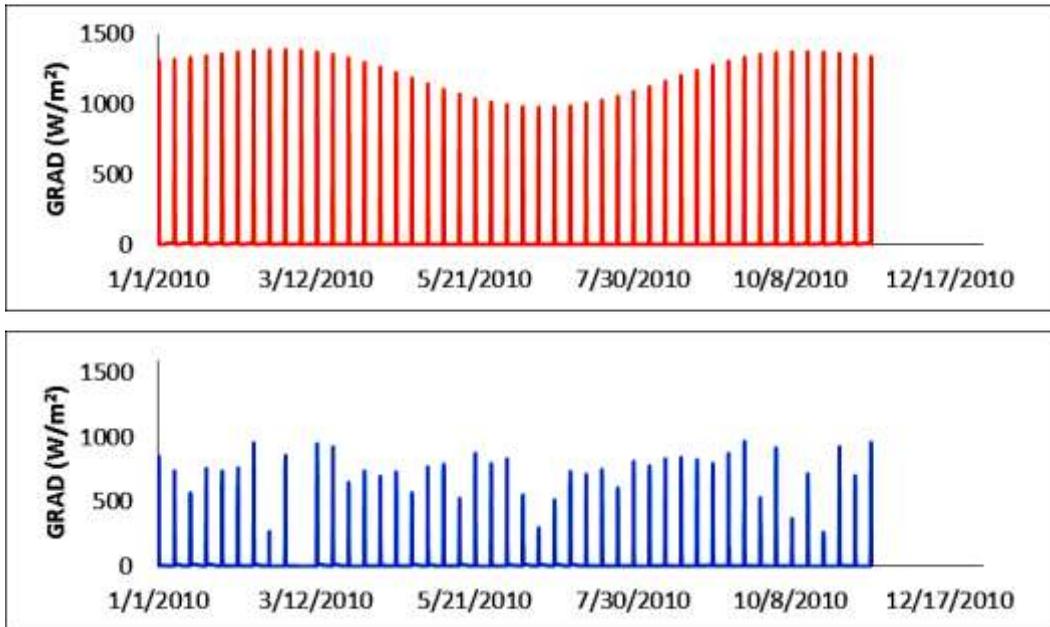


Gambar 4.4 Perbandingan data pengukuran intensitas radiasi dengan estimasi ($k=1$) untuk 1 Januari 2010

Jam	pengukuran (W/m ²)	Estimasi (k=1); w/m ²
13:00:00	788	1149
13:30:00	643	1032
14:00:00	185	891
14:30:00	84	738
15:00:00	65	579
15:30:00	78	425
16:00:00	97	285
16:30:00	71,5	166
17:00:00	44,5	77
17:30:00	23,9	20
18:00:00	11,2	0
Sumber	BLH Kota Sby	Perhitungan

Tabel 4.6 dan Gambar 4.4 menunjukkan intensitas pengukuran yang lebih rendah dari estimasi. Fluktuasi yang berbeda dari kurva normal pada grafik data pengukuran dimungkinkan karena faktor-faktor lain yang spesifik dan insidental. Faktor tersebut salah satunya adalah kemungkinan tutupan awan yang cukup dominan, karena pada bulan tersebut adalah musim penghujan.

Perhitungan estimasi intensitas radiasi (dengan $k = 1$) untuk waktu-waktu yang lain dalam kurun waktu satu tahun (Januari 2010 – Desember 2010) telah dilakukan, diambil contoh untuk tanggal 1 dan 15 pada setiap bulannya. Hasil estimasi dibandingkan visual dengan hasil pengukuran, pada tanggal yang sama, ditampilkan pada grafik dalam Gambar 4.5. Nilai $k = 1$ memberikan hasil rata-rata yang lebih tinggi dari data pengukuran. Analisis gambar menunjukkan secara umum pola rata-rata intensitas radiasi adalah mirip, dengan radiasi terbesar pada kira-kira tengah hari, antara pukul 11 sampai dengan pukul 12. Namun nilai rata-rata intensitas pengukuran lebih rendah dari hasil estimasi, hal ini menunjukkan bahwa nilai k harus kurang dari 1.



Gambar 4.5 (a) estimasi model-awal radiasi dan (b) data mingguan pengukuran radiasi permukaan Surabaya januari-desember 2010 pada mulai tanggal 1 januari.

Pola umum yang sama ditunjukkan Gambar 4.5 di atas, yaitu radiasi maksimum terjadi pada sekitar siang hari. Jika ditinjau perubahan setiap bulannya, data pengukuran Surabaya menunjukkan adanya pergeseran-pergeseran puncak atau fluktuasi yang besar setiap saatnya. Hal ini diduga karena perubahan kondisi atmosfer riil yang terjadi, antara lain:

1. Tutupan mendung (n/N), menghalangi radiasi secara langsung yang diterima alat ukur radiasi. Nampak pada data harian, radiasi dapat turun dan naik kembali, dengan cepat. Diduga karena adanya tutupan awan/mendung.
2. Kecerahan atmosfer atau opasitas. Kabut atau pencemar (baik gas maupun partikel) merupakan matriks yang dapat mengurangi intensitas matahari yang diteruskan ke alat ukur radiasi. Matriks pereduksi radiasi ini secara matematik dapat dinyatakan sebagai faktor k .

4.1.2.2. Analisis data dan penentuan nilai k atmosfer dalam model intensitas radiasi

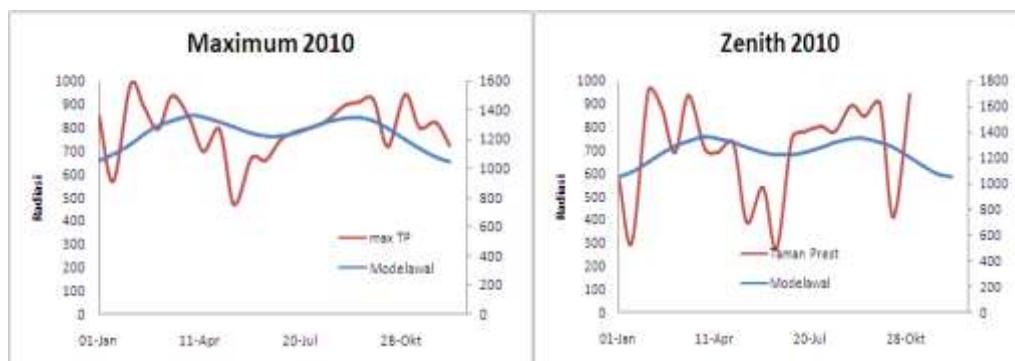
Lebih spesifik, estimasi dan data pengukuran dipisahkan berdasarkan perubahan musim. Dalam kasus Kota Surabaya, musim bergantian sepanjang tahun dengan musim hujan (Oktober – Maret) dan musim kemarau (April – September). Pada musim kemarau, intensitas radiasi nampak lebih rendah, karena pada waktu

sekitar bulan juni posisi matahari berada di belahan utara khatulistiwa sehingga resultan sudut zenith menjadi lebih besar (menjauhi titik meridian, posisi matahari tegak lurus).

Pada tahap ini, dianalisis karakteristik data yang dikumpulkan dengan beberapa aspek analisis yaitu, data maksimum, data saat zenith, data terpilih dengan asumsi tidak ada tutupan mendung atau tutupan minimal sepanjang hari, dan data permusim (kemarau dan hujan). Tujuan analisis ini adalah menentukan korelasi dan nilai k analitis. Keduanya akan dijadikan dasar hipotesis penentuan karakteristik atmosfer di wilayah studi, dan dinyatakan dalam nilai konstanta. Jika nilai k ini konsisten terhadap semua data atau mayoritas data, maka nilai k ini akan dijadikan pernyataan karakteristik atmosfer terhadap intensitas radiasi yang diterima di permukaan.

Analisis tersebut antara lain:

1. Analisis terhadap radiasi maksimum yang terjadi sepanjang hari dalam setahun dan radiasi saat zenith (matahari tepat tegak lurus dengan bidang datar di bumi) adalah sebagai berikut:



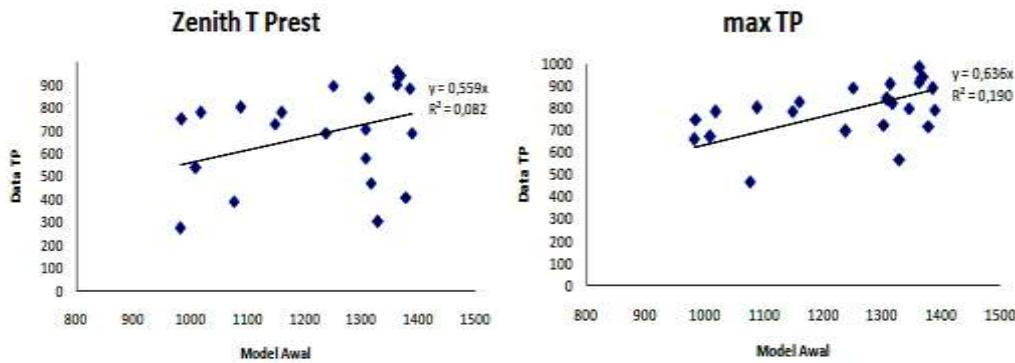
Gambar 4.6 Radiasi maksimum dan radiasi saat zenith sepanjang tahun 2010 model dan data

Nampak bahwa baik model maupun data menunjukkan pola yang cenderung sama. Fluktuasi yang terjadi pada penggambaran data diduga karena

- a. Matriks-matriks yang terjadi di atmosfer Surabaya.
- b. Data pengukuran saat zenith belum tentu menghasilkan data intensitas maksimum, tergantung kondisi atmosfer saat data direkam. Ada kemungkinan saat matahari zenith, cahaya tertutup oleh awan/mendung sehingga yang sampai ke alat ukur menjadi kecil

c. Data maksimum yang dianalisis dalam Gambar 4.6, kemungkinan juga terjadi pada waktu yang berbeda dengan estimasi model. Estimasi model saat zenith adalah juga merupakan estimasi intensitas radiasi maksimum.

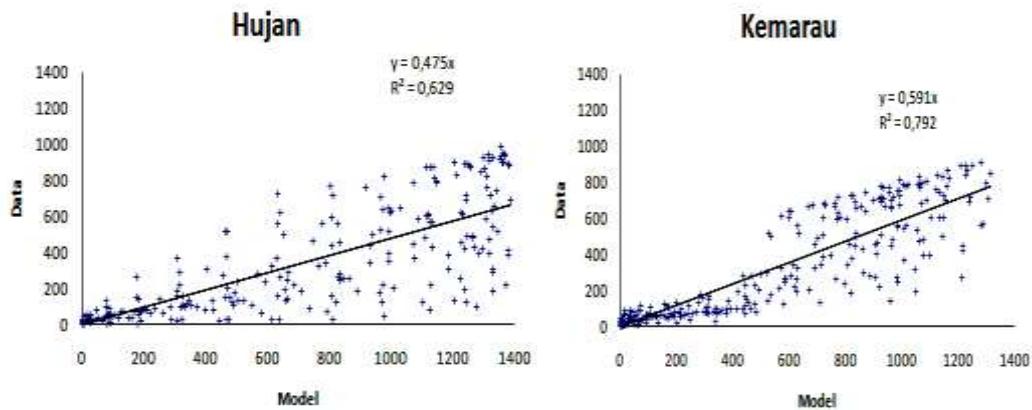
Korelasi estimasi radiasi model awal dengan data radiasi saat zenith dan maksimum ditentukan dengan regresi linear seperti pada Gambar 4.7. Secara acak, model awal tidak terlalu baik mengestimasi radiasi karena faktor-faktor pereduksi radiasi yang tidak diketahui dengan kuantitatif.



Gambar 4.7 Korelasi estimasi dan data pada saat zenith dan radiasi maksimum

Nilai slope pada kedua grafik Gambar 4.7 adalah 0,56 dan 0,64. Nilai ini berbeda karena saat matahari berada di puncak (zenith) pada kenyataannya belum tentu menghasilkan intensitas yang maksimum (mungkin ada tutupan awan saat zenith), ini dinyatakan dengan nilai korelasi yang rendah (R^2). Dengan demikian nilai k dari tahap ini hanya digunakan acuan kisaran korelasi antara data pengukuran dengan model estimasi awal.

2. Analisis terhadap data musiman (musim kemarau dan musim hujan) dan korelasinya dengan hasil estimasi model. Analisis ini dilakukan terhadap data yang ditampilkan pada Gambar 4.5. Data-data tersebut dikelompokkan berdasarkan musim penghujan dan musim kemarau. Hasil analisis korelasi model dengan data dinyatakan pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Korelasi estimasi dan data pada saat musim hujan dan kemarau

Nilai slope (k) pada musim penghujan adalah 0,475 sedangkan pada musim kemarau 0,591 seperti pada Gambar 4.8. Perbedaan ini dimungkinkan juga karena faktor tutupan awan/mendung. Nilai korelasi data dengan estimasi yang lebih rendah pada musim hujan mengindikasikan faktor tutupan awan tersebut lebih dominan pada musim hujan.

3. Analisis menggunakan data terpilih dengan asumsi tidak ada tutupan mendung atau tutupan minimal sepanjang hari. Data terpilih ini berdasarkan analisis grafik. Data-data yang menunjukkan kurva normal mendekati sempurna (mempunyai pola mirip dengan model estimasi teoritis), mengindikasikan pengaruh tutupan awan pada waktu tersebut tidak dominan. Berdasarkan analisis tersebut, data-data yang memenuhi maksud ini terjadi pada tanggal 1 Feb 2010, 15 Feb 2010, 15 maret 2010, 15 Juli 2010, 15 Agustus 2010, 1 Sept 2010, 1 Nop 2010, dan 1 Des 2010. Pada Tabel 4.7 berikut ditampilkan data pengukuran pada tanggal-tanggal yang dimaksud yang diresume dalam grafik pada Gambar 4.9.

Tabel 4.7 Intensitas radiasi sesuai dengan waktu dari data-data terpilih

Pukul	Intensitas Radiasi (W/m^2) – Data					
	01-Jan	15-Feb	15-Mar	15-Jul	15-Agust	01-Sep
5:30:00	0	0	0	0	5	0
6:00:00	23	20	23	5	11	12
6:30:00	55	47	55	22	29	34
7:00:00	79	79	73	37	52	55
7:30:00	131	94	91	53	110	75
8:00:00	233	106	145	66	136	126
8:30:00	291	130	497	70	174	218

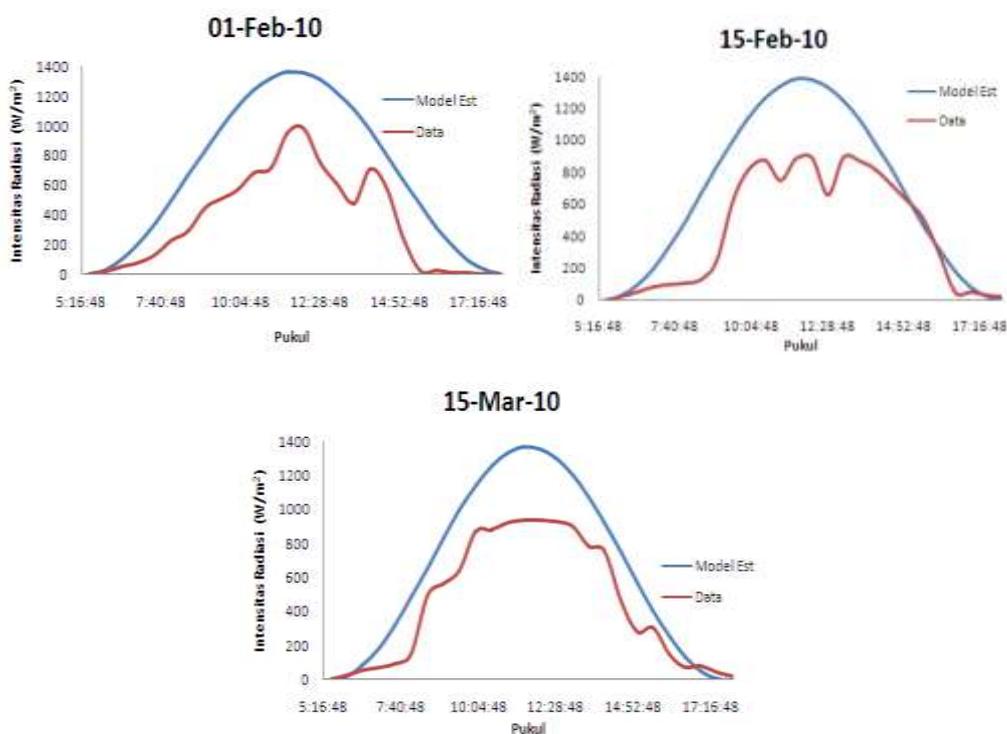
9:00:00	453	242	561	248	327	601
9:30:00	513	622	642	599	494	707
10:00:00	567	814	871	652	481	771
10:30:00	686	876	879	716	682	822
11:00:00	717	745	924	723	741	868
11:30:00	955	882	935	779	778	894
12:00:00	983	887	934	783	828	887
12:30:00	757	656	925	770	697	866
13:00:00	619	890	899	739	746	827
13:30:00	479	869	783	681	633	776
14:00:00	708	819	757	554	674	718
14:30:00	590	714	458	200	610	639
15:00:00	259	616	280	77	192	225
15:30:00	28	513	303	65	127	158
16:00:00	26	287	143	58	125	116
16:30:00	17	49	72	75	85	116
17:00:00	9	48	77	33	59	83
17:30:00	6	31	41	13	23	16
18:00:00	3	18	13	5	5	6

Data-data tersebut kemudian dibandingkan dengan data estimasi model pada waktu yang sama. Korelasi kedua nilai pada kedua tabel ini akan dianalisis sebagai nilai k.

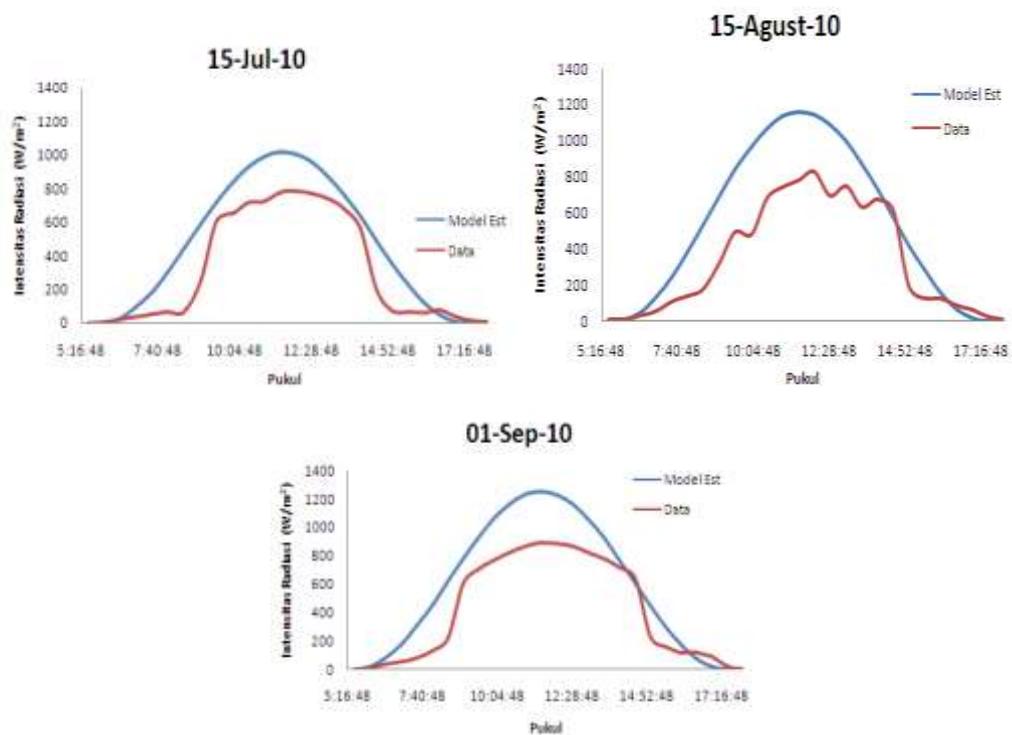
Tabel 4.8 Intensitas radiasi sesuai waktu pada data terpilih

Pukul	Intensitas Radiasi (W/m ²) – Estimasi Model					
	01-Jan	15-Feb	15-Mar	15-Jul	15-Agust	01-Sep
5:30:00	2	1	0	0	0	0
6:00:00	34	26	19	1	6	16
6:30:00	105	93	81	28	49	76
7:00:00	211	197	184	93	130	173
7:30:00	345	333	319	189	245	303
8:00:00	500	490	479	310	383	455
8:30:00	667	661	652	445	536	618
9:00:00	834	834	827	585	692	783
9:30:00	993	998	993	719	839	936
10:00:00	1132	1142	1139	837	968	1067
10:30:00	1244	1259	1254	930	1069	1168
11:00:00	1322	1340	1331	992	1135	1230
11:30:00	1364	1385	1368	1018	1161	1251
12:00:00	1357	1378	1355	1005	1144	1228
12:30:00	1312	1333	1300	955	1088	1162
13:00:00	1229	1247	1204	871	995	1060

Pukul	Intensitas Radiasi (W/m^2) – Estimasi Model					
	01-Jan	15-Feb	15-Mar	15-Jul	15-Agust	01-Sep
13:30:00	1112	1126	1074	761	872	927
14:00:00	969	978	918	631	728	773
14:30:00	808	813	746	492	573	608
15:00:00	640	640	570	354	419	445
15:30:00	475	470	402	227	276	294
16:00:00	322	315	252	122	155	166
16:30:00	192	183	131	46	65	71
17:00:00	91	83	47	6	12	14
17:30:00	26	21	5	0	0	0
18:00:00	0	0	0	0	0	0



Gambar 4.9 Perbandingan hasil estimasi dan data dengan tutupan awan minimal (musim hujan)

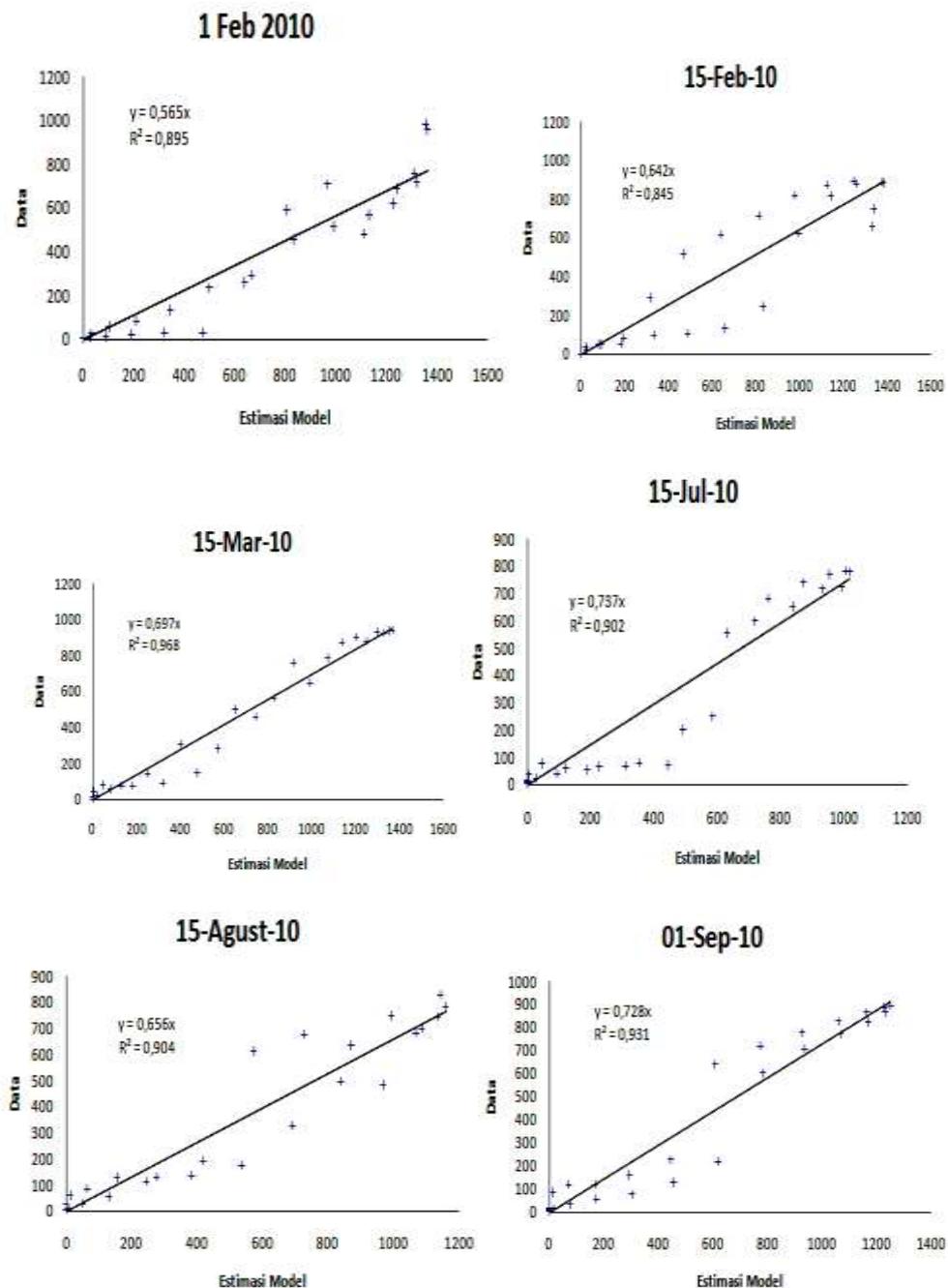


Gambar 4.10 Perbandingan hasil estimasi dan data dengan tutupan awan minimal (musim kemarau)

Data pada Tabel 4.8 dan serta Gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan pola yang lebih dekat antara estimasi dan data pengukuran. Nampak bahwa korelasi keduanya pada waktu yang sama lebih baik. Hasil perhitungan korelasi data antara estimasi model dan data pengukuran dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.11 berikut:

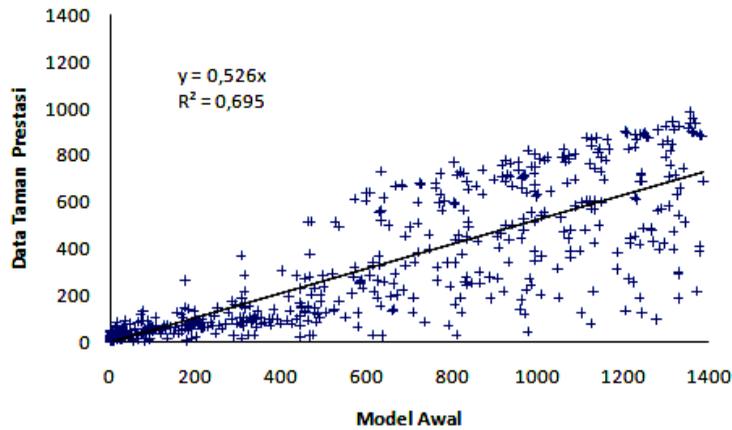
Tabel 4.9 Korelasi dan slope (k) data terpilih dan estimasi model

Tanggal	korelasi (R^2)	Slope = k
01-Feb	0,895	0,565
15-Feb	0,845	0,642
15-Mar	0,968	0,697
rata-rata penghujan	0,903	0,635
15-Jul	0,902	0,737
15-Agust	0,904	0,656
01-Sep	0,931	0,728
rata-rata kemarau	0,912	0,707
rata-rata tahunan	0,908	0,671



Gambar 4.11 Korelasi estimasi dan data dengan tutupan awan minimal musim hujan dan musim kemarau

4. Korelasi dan slope semua data dan estimasi dalam kurun waktu Januari – Desember 2010 dinyatakan dalam Gambar 4.10. Dalam analisis data dan estimasi setahun, diperoleh nilai slope = $k = 0,526$ dan nilai korelasi ($R^2=0,695$) yang cukup baik.



Gambar 4.12 Korelasi estimasi model awal dan data pengukuran radiasi Januari – Desember 2010

Resume data korelasi dan slope dari analisis 1 sampai dengan 4, dinyatakan dalam Tabel 4.10 berikut:

Tabel 4.20 Resume nilai korelasi dan slope hasil 4 tahap analisis

Analisis ke:	Slope (=k)	Korelasi (R²)
1. Radiasi max atau zenith	0,56	0,08
	0,64	0,19
2. Musim (kemarau atau penghujan)	0,591	0,792
	0,475	0,629
3. Asumsi tutupan awan minimal (kemarau/hujan)	0,635	0,903
	0,707	0,912
	0,671 (rata-rata)	0,908 (rata-rata)
4. Rata-rata setahun	0,526	0,695

Hasil analisis yang dicantumkan dalam Tabel 4.10 atas, menunjukkan nilai slope atau k yang lebih baik digunakan untuk melakukan koreksi terhadap model estimasi adalah nilai slope yang dihasilkan dari analisis 3, yaitu $k = 0,671$. Nilai korelasi $R^2 > 0,9$ menunjukkan data dan hasil estimasi menunjukkan pola yang mirip dan konsisten. Kedua data ini menunjukkan matriks pengaruh yang hampir sama atau dekat. Dengan demikian asumsi tutupan mendung/ awan minimal cukup dekat dengan kondisi model.

4.1.2.3. Koreksi Model Estimasi dengan nilai k

Nilai k yang diperoleh dari analisis di atas, dimasukkan sebagai koreksi terhadap model, dengan persamaan:

$$S_s \text{terkoreksi} = k \times S_s \quad (4.18)$$

Secara prinsip nilai k merupakan akumulasi dari matriks proses atmosfer yang mempengaruhi intensitas radiasi matahari, yaitu hamburan dan serapan atmosfer (k_a), tutupan awan/mendung (n/N), opasitas atmosfer (ekivalen dengan pencemar udara di atmosfer O_p) dan faktor lain (c). Sehingga,

$$k = \left(k_a, \frac{n}{N}, O_p, c \right)$$

Maka,

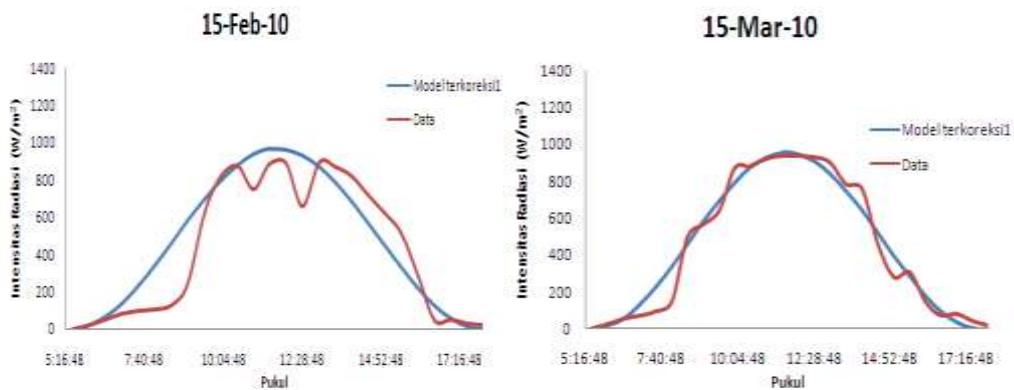
$$S_s \text{terkoreksi} = \left(k_a, \frac{n}{N}, O_p, c \right) \times S_s = k_a S_s - \left(\frac{n}{N} + O_p + c \right) \times S_s \quad (4.19)$$

Faktor tutupan awan/mendung telah didekati dengan analisis 3, sehingga untuk data-data terpilih pada analisis tersebut $n/N \sim 0$; nilai $k = 0,697 \sim (k_a, OP, c)$ untuk musim hujan dan $k = 0,737 \sim (k_a, OP, c)$ untuk musim kemarau. Menggunakan nilai k tersebut untuk mengkoreksi hasil estimasi model diperoleh hasil estimasi model intensitas radiasi seperti tercantum dalam Tabel 4.11 berikut:

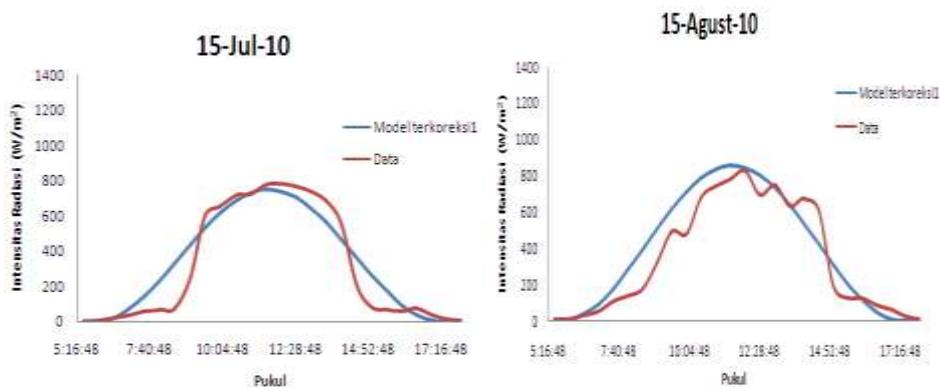
Tabel 4.11 Intensitas Radiasi (W/m^2) - estimasi model-terkoreksi

Jam	Intensitas Radiasi (W/m^2) - estimasi model-terkoreksi					
	01-Feb	15-Feb	15-Mar	15-Jul	15-Agust	01-Sep
5:30:00	1	1	0	0	0	0
6:00:00	24	18	13	1	4	12
6:30:00	73	65	57	21	36	56
7:00:00	147	138	128	68	96	128
7:30:00	241	232	222	140	180	223
8:00:00	349	342	334	228	283	335
8:30:00	465	461	454	328	395	456
9:00:00	582	581	577	431	510	577
9:30:00	692	695	692	530	619	690
10:00:00	789	796	794	617	714	786
10:30:00	867	878	874	686	788	861
11:00:00	921	934	928	731	836	907
11:30:00	951	966	953	750	855	922
12:00:00	946	961	945	740	843	905
12:30:00	914	929	906	704	802	857
13:00:00	856	869	839	642	733	781
13:30:00	775	785	749	561	643	683

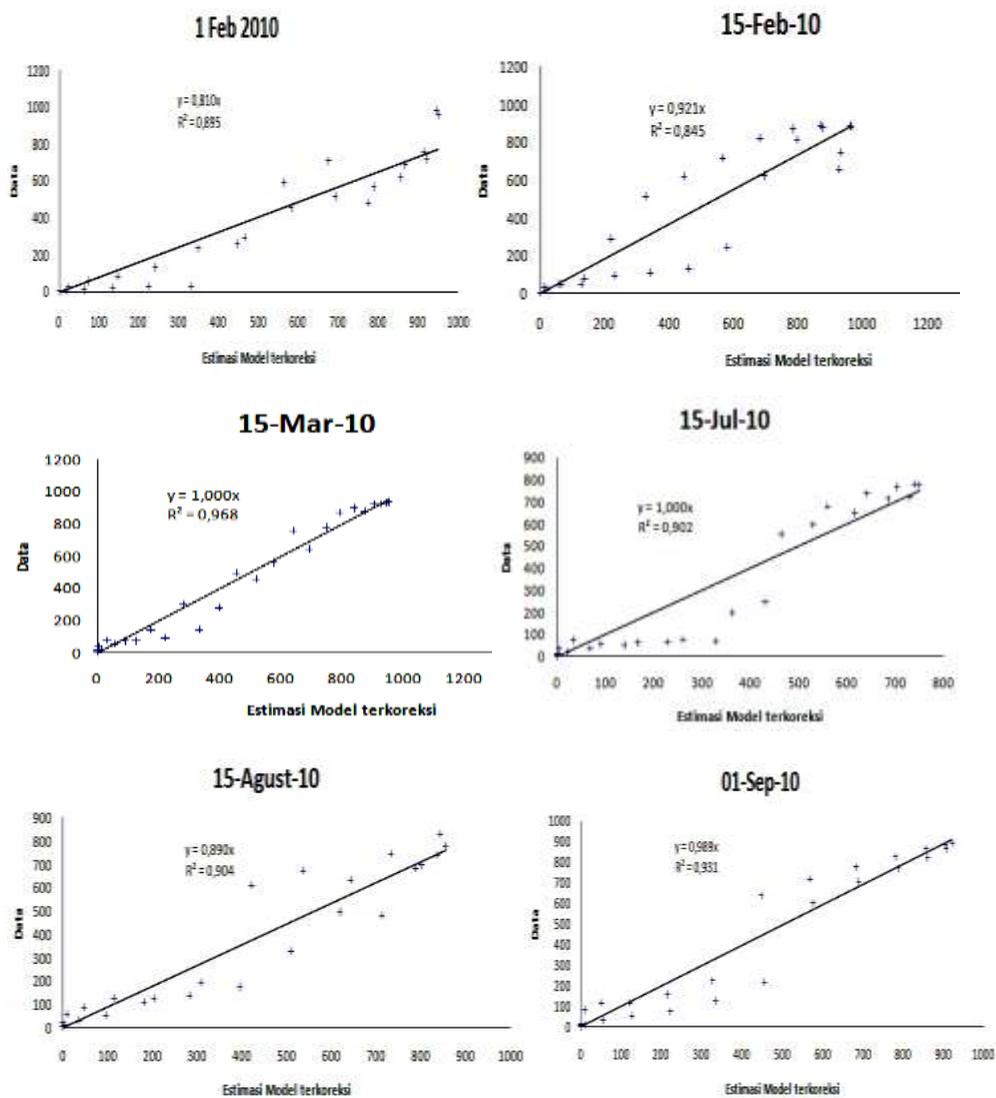
Jam	Intensitas Radiasi (W/m^2) - estimasi model-terkoreksi					
	01-Feb	15-Feb	15-Mar	15-Jul	15-Agust	01-Sep
14:00:00	675	682	640	465	536	569
14:30:00	563	566	520	362	422	448
15:00:00	446	446	397	261	309	328
15:30:00	331	328	280	167	203	217
16:00:00	225	219	176	90	114	122
16:30:00	134	128	92	34	48	52
17:00:00	64	58	33	4	9	10
17:30:00	18	14	3	0	0	0
18:00:00	0	0	0	0	0	0



Gambar 4.13 Perbandingan hasil estimasi terkoreksi dan data dengan tutupan awan minimal (musim hujan)



Gambar 4.14 Perbandingan hasil estimasi dan data dengan tutupan awan minimal (musim kemarau)



Gambar 4.15 Korelasi estimasi dan data dengan tutupan awan minimal musim hujan (atas) dan musim kemarau (bawah)

Tabel 4.12 Korelasi dan slope (k) data terpilih dan estimasi model terkoreksi

Tanggal	korelasi (R^2)	Slope = k
01-Feb	0,895	0,810
15-Feb	0,845	0,921
15-Mar	0,968	1,000
rata-rata penghujan	0,903	0,910
15-Jul	0,902	1,000
15-Agust	0,904	0,890
01-Sep	0,931	0,989
rata-rata kemarau	0,912	0,960
rata-rata tahunan	0,908	0,935

Nilai slope data terpilih dan model terkoreksi yang mendekati 1 mengindikasikan nilai-nilai yang dihasilkan oleh model terkoreksi mendekati nilai-nilai data pengukuran, pada kondisi yang ditetapkan. Karena pengaruh-pengaruh tutupan mendung (n/N), opasitas (O_p), dan faktor lain dianggap kecil, maka nilai k yang dihasilkan dapat diasumsikan merupakan sifat serapan dan hamburan atmosfer (k_a) saja.

$$S_s = k \frac{S_0}{AM}$$

$$S_s \text{ koreksi} = \left(k_a, \frac{n}{N}, O_p, c \right) \times S_s = 0,697 \times S_s \quad (4.20)$$

Namun jika diterapkan pada kondisi yang lain, harus diperhitungkan nilai-nilai n/N dan O_p . Dengan memasukkan kedua variabel ini maka model terkoreksi untuk estimasi intensitas permukaan dapat ditulis lengkap menjadi:

$$S_s \text{ koreksi} = \left(k_a, \frac{n}{N}, O_p, c \right) \times S_s = 0,697 \times S_s - \left(\frac{n}{N}, O_p, c \right) \times S_s \quad (4.21)$$

4.1.2.4. Koreksi nilai k dengan n/N dan O_p

Tahap berikutnya adalah melakukan koreksi nilai k dengan memperhitungkan pengaruh tutupan mendung/awan dan opasitas atmosfer. Pengaruh tutupan mendung/awan diestimasi berdasarkan data analisis *cloud cover* dari BMKG. Sedangkan perubahan opasitas akan ditentukan secara tidak langsung dari perubahan status ISPU atau konsentrasi pencemar akumulasi (berdasarkan data BLH Kota Surabaya). Secara teori, molekul-molekul gas dapat menyerap intensitas sinar yang melewatinya dengan jumlah dan jenis yang spesifik. Jumlah intensitas yang diserap tergantung konsentrasi molekul tersebut di udara, dan jenis gelombang yang diserap sesuai dengan tingkat energi eksitasi molekul-molekul tersebut. Dengan dasar ini, secara keseluruhan keberadaan molekul-molekul gas di atmosfer akan sangat mempengaruhi intensitas yang diteruskan setelah melewatinya. Sesuai hukum Beer-Lambert, intensitas yang diserap oleh sejumlah molekul adalah

$$A \sim \frac{I_0 - I_t}{I_0} = k \times C \quad (4.22)$$

Dalam status ISPU, nilai ISPU berbanding lurus dengan konsentrasi pencemar, sehingga persamaan di atas dapat juga dinyatakan:

$$C \sim ISPU \sim O_p$$

$$A \sim \frac{I_0 - I_t}{I_0} = k^n ISPU \Rightarrow \Delta I = I_0 k^n ISPU$$

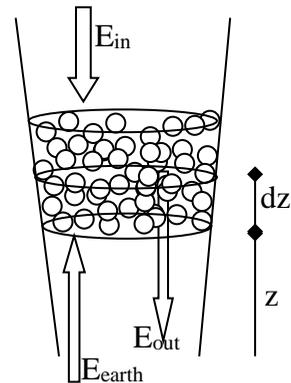
Dengan mengambil $I_0 = S_s$ maka persamaan tersebut dapat disubstitusi ke persamaan, sehingga dihasilkan:

$$S_s \text{terkoreksi} = 0,697 \times S_s - \left(\frac{n}{N}, c\right) \times S_s - S_s k^n \text{ISPU} \quad (4.23)$$

4.2. Pengaruh Intensitas Radiasi terhadap temperatur, tekanan atmosfer, dan *mixing height*

Adanya energi radiasi yang diterima langsung atau dilepaskan oleh molekul-molekul udara di atmosfer dan energi yang dipancarkan dari permukaan bumi (dapat disamakan dengan radiasi benda hitam), menyebabkan kondisi kesetimbangan yang dimodelkan pada sub bab 4.2.1, mengalami pergeseran. Tekanan, temperatur, densitas atmosfer bisa lebih besar atau lebih kecil. Dan karena kuat radiasi tidak sama besar ketika diterima di bagian-bagian atmosfer, maka pergeseran kesetimbangan menjadi tidak sama.

Gambar 4.16 Kesetimbangan energi pada volume kontrol di atmosfer



Energi yang ditambahkan pada sejumlah molekul-molekul udara (sebagai panas laten (λE)) merupakan resultan dari energi radiasi yang diterima langsung dari matahari (R_n) dan energi radiasi dari bumi (G) (pantulan atau radiasi benda hitam) dikurangi energi yang dilepaskan kembali ke lingkungannya (lihat Gambar 4.16) dalam bentuk panas sensibel (H) atau radiasi ke *outer space* (pada bagian atas atmosfer).

$$R_n = H + \lambda E + G \quad (4.24)$$

Energi resultan ini digunakan oleh molekul-molekul menaikkan energi kinetiknya (menambah panas) dan berekspansi. Ketika berekspansi molekul-molekul akan berkurang densitasnya sehingga terdorong ke elevasi lebih tinggi. Disaat bersamaan ekspansi ini menyebabkan molekul-molekul kembali menurunkan energinya kembali.

Di sisi lain, energi radiasi (R_n) matahari yang diterima bumi dapat didekati dengan hukum Stefan-Boltzmann, dimana total radiasi diemisikan dari benda hitam pada temperatur T adalah:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T)d\lambda = \sigma T^4 \quad (4.25)$$

Dimana σ adalah konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Rumus tersebut digunakan untuk menganalisis hubungan radiasi dan temperatur. Secara prinsip radiasi yang terukur akan dicari korelasinya dengan temperatur terukur. Dengan asumsi $S_s \sim R_n \sim B(T)$ dan $T_0 \sim T$ maka

$$R_n \sim \sigma T^4 \rightarrow S_s \sim \sigma T^4 \rightarrow T^4 = k S_s / \sigma \quad (4.26)$$

4.2.1. Pendekatan kesetimbangan gaya dan Termodinamika Atmosfer untuk Memodelkan Strata Tekanan dan Temperatur Atmosfer Bawah

4.2.1.1. Tekanan Atmosfer

Molekul-molekul gas berada dalam kesetimbangan gaya di atmosfer, sehingga dapat eksis di tempatnya sepanjang tidak ada gangguan oleh gaya lain. Dalam keadaan ini:

$$F_{up} - F_{down} = 0 \quad (4.27)$$

Gaya yang bekerja ke atas ($F_{up} = P_{(z)}. A$) adalah gaya tekan atmosfer bagian bawah (permukaan), sedangkan gaya yang bekerja ke bawah disebabkan oleh gaya tekan atmosfer bagian atas ($F_{down} = P_{(z+dz)}. A$) dan gaya berat molekul tersebut ($F_{down} = m.g = \rho.V.g = \rho.A.dz.g$). Dengan demikian

$$\begin{aligned} F_{up} - F_{down} &= P_z A - P_{z+dz} A - \rho A g dz = P_z - P_{z+dz} - \rho g dz = 0 \\ -dP - \rho g dz &= 0 \\ \frac{dP}{dz} &= -\rho g \end{aligned} \quad (4.28)$$

Persamaan ini dinamakan **persamaan hidrostatik** untuk atmosfer. Penyelesaian persamaan di atas adalah dengan pernyataan keadaan teori termodinamika keadaan gas, $\rho = nM_m/V$, maka:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dz} &= -\frac{n M_m}{V} g = -\frac{P M_m}{RT} g \\ \int_0^z \frac{dP}{P} &= -\int_0^z \frac{M_m}{RT} g dz \end{aligned}$$

Hasil dari estimasi tekanan menggunakan persamaan ini, telah disampaikan pada sub bab 4.1.1 dalam Gambar 4.2.

Kalibrasi Profil Tekanan menggunakan temperatur (T) sebagai fungsi altitude (z)

Di atmosfer temperatur berubah karena ketinggian (*lapse rate*). Dengan menggunakan hubungan T dengan altitude sesuai persamaan 4.5:

$$T = T_0 - \frac{M_m g}{C_p} z = \frac{T_0 C_p - M_m g z}{C_p} \quad (4.29)$$

dan asumsi g tetap, maka substitusi persamaan tersebut pada persamaan 4.28 tekanan sebagai fungsi *altitude* dapat disusun ulang menjadi:

$$\int_0^z \frac{dP}{P} = - \frac{M_m g}{R} \int_0^z \frac{C_p}{T_0 C_p - M_m g z} dz = - \frac{M_m g}{R} C_p \int_0^z \frac{1}{T_0 C_p - M_m g z} dz$$

Substitusi z dengan $T_0 C_p - M_m g z$, diperoleh penyelesaian integral diatas sebagai

$$\begin{aligned} \int_0^z \frac{dP}{P} &= - \frac{M_m g}{R} C_p \left(- \frac{1}{M_m g} \right) \int_{T_0 C_p}^{T_0 C_p - M_m g z} \frac{1}{T_0 C_p - M_m g z} d(T_0 C_p - M_m g z) \\ \ln \frac{P}{P_0} &= \frac{C_p}{R} \ln \frac{T_0 C_p - M_m g z}{T_0 C_p} = \frac{C_p}{R} \ln \left(1 - \frac{M_m g}{T_0 C_p} z \right) \\ P &= P_0 e^{\frac{C_p}{R} \ln \left(1 - \frac{M_m g}{T_0 C_p} z \right)} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Kalibrasi diperlukan untuk menyesuaikan dengan data monitoring di kota Surabaya. Sehingga persamaan terakhir dapat dimodifikasi dengan memasukkan k , menjadi:

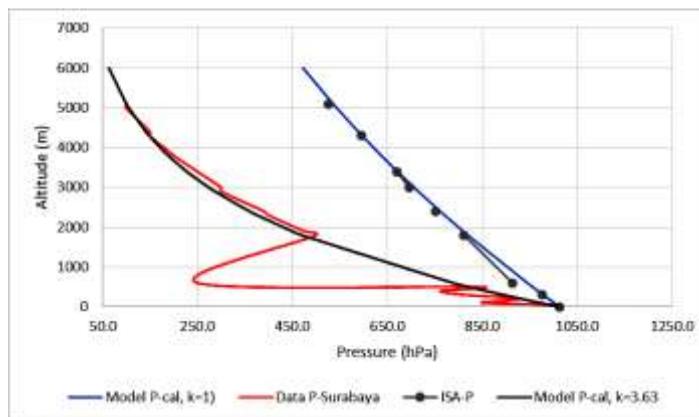
$$P = P_0 e^{k \frac{C_p}{R} \ln \left(1 - \frac{M_m g}{T_0 C_p} z \right)} \quad (4.31)$$

Aplikasi persamaan perubahan tekanan (dengan beberapa nilai k) hasil perhitungan dan data monitoring atmosfer Surabaya dicantumkan dalam Tabel 4.13 dan Gambar 4.17 berikut:

Tabel 4.13. Nilai-nilai estimasi tekanan, temperatur ($k = 1; 2.35; \text{ dan } 3.63$), ISA, data Surabaya

Altitude (z)	Gravity	Temperatur (K)				Pressure (hPa)				
		m	m/s ²	k=1	k=2.35	ISA	Data Sby	k=1	k=3.63	ISA
6000	9.81		240.92	179.42			473.0	63.8		
5100	9.81		249.74	195.23	254.5	191.4	536.2	100.6	527.0	100.0
5000	9.81		250.72	197.04		189.9	543.6	105.7		100.0
4400	9.81		256.59	208.07		204.6	589.3	141.8		150.0
4300	9.81		257.57	209.94	260.5	203.5	597.2	148.8	595.0	150.0
3900	9.81		261.49	217.52		217.0	629.5	180.2		190.0
3800	9.81		262.47	219.44		219.9	637.8	188.9		200.0
3400	9.81		266.39	227.22	266.4	233.5	671.6	227.9	670.0	250.0

Altitude (z) m	Gravity m/s ²	Temperatur (K)				Pressure (hPa)			
		k=1	k=2.35	ISA	Data Sby	k=1	k=3.63	ISA	Data Sby
3000	9.81	270.31	235.15	268.4	243.7	706.7	274.2	697.0	300.0
2900	9.81	271.29	237.16		241.6	715.7	287.0		300.0
2400	9.81	276.19	247.34	272.4	255.0	761.8	360.0	753.0	390.0
2300	9.81	277.17	249.41		257.7	771.3	376.5		400.0
1900	9.81	281.09	257.78		265.9	810.0	449.8		475.0
1800	9.81	282.07	259.89	276.3	267.5	819.9	470.0	812.0	500.0
600	9.81	293.82	286.07	284.2	232.2	945.4	788.3	914.0	250.0
500	9.81	294.80	288.32		291.5	956.4	822.2		850.0
400	9.81	295.78	290.57		285.7	967.5	857.5		762.5
300	9.81	296.76	292.84	286.2	288.7	978.8	894.2	977.0	812.5
200	9.81	297.74	295.12		295.4	990.1	932.3		925.0
100	9.81	298.72	297.40		290.4	1001.5	971.9		850.0
50	9.81	299.21	298.55		298.9	1007.2	992.2		1000.0
0	9.81	299.70	299.70	288.2	299.7	1013.0	1013.0	1013.0	1007.5



Gambar 4.17 Profil tekanan (P) model adiabatik terkalibrasi, ISA, dan data Surabaya

Hasil estimasi tekanan menggunakan persamaan terkalibrasi T fungsi z dan $k = 3.63$ seperti pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.17, menunjukkan nilai yang cukup dekat dengan data Surabaya. Sedangkan nilai $k=1$ sangat dekat dengan nilai-nilai rata-rata tekanan global yang dinyatakan dalam *International Standard Atmosphere* (ISA). Dengan demikian persamaan termodifikasi T sebagai fungsi altitude dan k dalam range 1 - 3.63 cukup baik menggambarkan profil tekanan sebagai fungsi altitude ($P=f(z)$).

4.2.1.2. Temperatur Atmosfer

Pernyataan hukum I termodinamika, perubahan kalor pada sistem tersimpan menjadi energi dalam (U) dan sebagian digunakan untuk kerja sistem.

$$dQ = dU - dW \quad (4.32)$$

Pada sistem adiabatik, dimana tidak ada perpindahan kalor dari sistem ke lingkungan ($dQ=0$), sehingga:

$$dU = dW \quad (4.33)$$

Asumsi ini hanya digunakan untuk menjelaskan perubahan keadaan dimana tidak ada energi luar yang masuk ke dalam sistem. Perubahan keadaan ini terjadi karena perubahan posisi atau tekanan dan volume saja dan bersifat reversibel. Energi dalam setiap gas tetap pada temperatur yang tetap ($dU=TdS-PdV=0$):

$$dQ = TdS \text{ dan } dW = -PdV$$

Sehingga:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} PdV = -nRT \int_{V_0}^V \frac{dV}{V} = nRT \ln \frac{V}{V_0} \quad (4.34)$$

Jika $dU=0$, maka

$$\begin{aligned} TdS - PdV &= TdS - nRTdV = 0 \\ dS &= nRdV \text{ atau } S = nR \ln \frac{V}{V_0} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Pada pernyataan keadaan dasar termodinamika dan perubahannya

$$\begin{aligned} PV &= nRT \text{ dan } d(PV) = nR(dT) \\ PdV + VdP &= nRdT \end{aligned}$$

Entalpi (H) dinyatakan dengan energi dalam dan volume (V), tekanan (P)

$$\begin{aligned} H &= U + PV \\ dH &= dU + d(PV) = dU + PdV + VdP \\ dU &= dW + dQ = -PdV + TdS \\ dH &= -PdV + dQ + PdV + VdP \\ dH &= VdP + dQ = nC_p dT \end{aligned}$$

Pada kondisi asumsi adiabatik, $dQ = 0$ (tidak ada transfer kalor dari *parcel* udara ke lingkungan, jadi perubahan kalor hanya digunakan untuk merubah suhu, tekanan, atau volume *parcel* saja) maka:

$$\begin{aligned} VdP &= nC_p dT \\ \frac{dT}{dP} &= \frac{V}{nC_p} = \frac{RT}{PC_p} \end{aligned}$$

Kalibrasi Profil Temperatur menggunakan perubahan tekanan (P) sebagai fungsi altitude

Identik dengan temperatur, profil tekanan juga berubah sebagai fungsi *altitude*. Hubungan T, P dan altitude (z) dapat digunakan untuk mengkalibrasi persamaan P atau T. Hubungan tersebut diantaranya adalah:

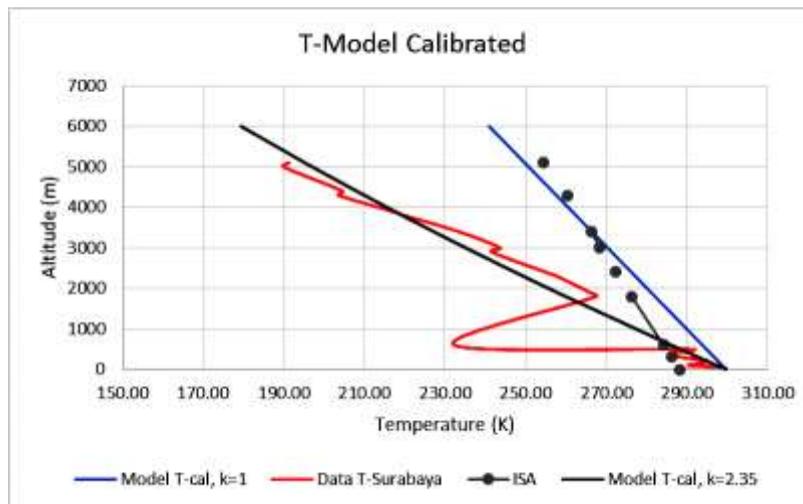
$$\frac{dT}{dP} = \frac{RT}{PC_p}$$

$$\int_{T_0}^T \frac{dT}{T} = \frac{R}{C_p} \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\ln \frac{T}{T_0} = \frac{R}{C_p} \ln \frac{P_0 e^{k \frac{C_p}{R} \ln \left(1 - \frac{M_m g}{T_0 C_p} z \right)}}{P_0} = k \ln \left(1 - \frac{M_m g}{T_0 C_p} z \right)$$

$$T = T_0 e^{k \ln \left(1 - \frac{M_m g}{T_0 C_p} z \right)} \quad (4.36)$$

Menggunakan persamaan tersebut dan data-data yang dihasilkan di Kota Surabaya, telah dihasilkan estimasi temperatur terkalibrasi seperti ditampilkan pada Tabel 15. Penggambaran nilai-nilai tersebut dinyatakan dalam Gambar 18.



Gambar 4.18 Profil Temperatur (T) model adiabatik terkalibrasi, ISA, dan data Surabaya

Hasil estimasi temperatur menggunakan persamaan terkalibrasi P fungsi z dan $k = 2.35$ seperti pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.18, menunjukkan nilai yang cukup dekat dengan data Surabaya. Sedangkan nilai $k = 1$ sangat dekat dengan nilai-nilai rata-rata tekanan global yang dinyatakan dalam ISA. Dengan demikian persamaan termodifikasi P sebagai fungsi altitude dan k dalam range 1 – 2.35 cukup baik menggambarkan profil temperatur sebagai fungsi *altitude* ($T=f(z)$).

4.2.2. *Bouyancy*, koreksi temperatur dan tekanan karena perubahan keadaan fasa

Pergerakan *parcel* udara diasumsikan adiabatik, sehingga dimungkinkan temperatur *parcel* udara tidak selalu sama dengan temperatur ambien (lingkungan). Berdasarkan prinsip kesetimbangan tekanan, posisi *parcel* udara akan tetap bergerak sampai diperoleh kesetimbangan tekanan antara *parcel* udara dengan udara ambien (lingkungan).

Pergerakan *parcel* secara vertikal (dengan mengikuti perubahan *altitude*), terjadi jika fungsi temperatur dan tekanan *parcel* $f(T_p, P_p)$ tidak sama dengan fungsi temperatur dan tekanan udara ambien $f(T, P)$. *Parcel* udara juga dipengaruhi oleh gravitasi dan gaya apung (*buoyancy*) mengikuti prinsip Archimedes, dan pergerakannya mengikuti hukum Newton. Ketiga prinsip tersebut dinyatakan secara matematis untuk perbedaan gaya *parcel* (F_p) dengan gaya tekan udara ambien (F_a)

$$F = F_a - F_p = \Delta m g = (\rho - \rho_p) V g \quad (4.37)$$

Dan resultan gaya yang berada di *parcel* udara menyebabkan pergerakan vertikal,

$$F = m a = \rho_p V a \quad (4.38)$$

Substitusi kedua persamaan menjadi:

$$\begin{aligned} (\rho - \rho_p) V g &= \Delta \rho V g = \rho_p V a \\ a &= \frac{\Delta \rho V g}{\rho_p V} = \frac{1}{\rho_p} \Delta \rho g \\ a &= \frac{(\rho_a - \rho_p) V g}{\rho_p V} = \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) g = \left(\frac{T_p}{T} - 1 \right) g \end{aligned} \quad (4.39)$$

Dengan demikian jika $\rho_p < \rho$ maka nilai a positif, *parcel* akan bergerak ke arah vertikal dengan percepatan a . Pergerakan ini terjadi sampai dicapai kesetimbangan gaya atau $\rho_p = \rho$. Karena perubahan suhu, pada elevasi tertentu tekanan atau fasa $\rho_p > \rho$, nilai a negatif dan *parcel* kembali turun.

Dalam prinsip termodinamika densitas dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} = \frac{n M_m}{V} = \frac{M_m P}{R T} \\ d\rho &= \frac{M_m}{R} d\left(\frac{P}{T}\right) = \frac{M_m}{R} \frac{T dP - P dT}{T^2} \end{aligned}$$

Sementara persamaan hidrostatis atmosfer dituliskan $dP = -\rho g dz$ sehingga

$$\begin{aligned} d\rho &= \frac{M_m}{R} \frac{T(-\rho g dz) - \frac{\rho R T}{M_m} dT}{T^2} = -\frac{M_m}{R} \frac{T \rho g dz + \frac{\rho R T}{M_m} dT}{T^2} \\ \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{d\rho}{\rho} &= -\frac{M_m}{R} \left(\int_0^z \frac{g}{T} dz + \frac{R}{M_m} \int_{T_0}^T \frac{1}{T} dT \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\ln \frac{\rho}{\rho_0} &= -\frac{M_m}{R} \left(\frac{g}{T} z - \frac{R}{M_m} \ln \frac{T}{T_0} \right) \\
\rho &= \rho_0 e^{-\frac{M_m}{R} \left(\frac{g}{T} z - \frac{R}{M_m} \ln \frac{T}{T_0} \right)} \\
\rho &= \rho_0 e^{-\frac{M_m g}{R T} z + \ln \frac{T}{T_0}} \quad (4.40)
\end{aligned}$$

Adanya uap air terkandung dalam atmosfer dapat didekati dengan persamaan termodinamika yang dihubungkan dengan entalpi, dimana

$$dH = VdP + dQ = nC_p dT \quad (4.41)$$

Uap air di *ground* mengalami peningkatan tekanan (ekspansi) karena menerima kalor atau berada pada temperatur lebih tinggi dari udara ambien, sehingga mengalami pergerakan naik (*buoyancy*). $dQ = nL_v dq$ dengan $q = m_u/m_{RH}$ atau perbandingan massa uap air dengan massa kelembaban (kelembaban relatif jenuh).

Dengan demikian pada perubahan entalpi nol dengan $dP/dz = -\rho g$, maka

$$\begin{aligned}
VdP + dQ - nC_p dT &= 0 \\
VdP - mL_v dq &= nC_p dT \\
nC_p \frac{dT}{dz} &= \frac{VdP}{dz} - \frac{nL_v dq}{dz} = -\rho g V - \frac{mL_v dq}{dz} \\
\frac{dT}{dz} &= \frac{VdP}{dz} - \frac{nL_v}{dz} = -\frac{\rho g V}{nC_p} - \frac{mL_v dq}{nC_p dz} \\
-\frac{dT}{dz} &= M_m \left(\frac{g}{c_p} + \frac{L_v dq}{c_p dz} \right) = \Gamma_w \quad (4.42)
\end{aligned}$$

Persamaan terakhir merupakan perubahan temperatur dan fraksi uap air. Pada persamaan tersebut, jika $dq/dz < 0$; maka terjadi pelepasan panas *parcel* sehingga jumlah uap air menurun (proses kondensasi).

$$\begin{aligned}
-dT &= M_m \left(\frac{g}{c_p} dz + \frac{L_v}{c_p} dq \right) \\
-\int_{T_0}^T dT &= M_m \left(\frac{g}{c_p} \int_0^z dz + \frac{L_v}{c_p} \int_{q_0}^{q_z} dq \right) \\
T_0 - T &= M_m \left(\frac{gz}{c_p} + \frac{L_v}{c_p} (q_z - q_0) \right)
\end{aligned}$$

Maka T *parcel* uap air adalah

$$T_p = T_{p,0} - M_m \left(\frac{gz}{c_p} + \frac{L_v}{c_p} (q_z - q_0) \right) \quad (4.43)$$

Pada *ground* ($z=0$); $M_{uap}=0,018$ kg/mol; $C_p=29$ J/K.mol; $L_v = 2.5 \times 10^6$ J/kg; q adalah rasio massa uap air dengan massa udara lembab atau kelembaban spesifik (*specific humidity*).

Menggunakan persamaan *buoyancy* di atas (persamaan 4.39), model perubahan temperatur adiabatik (persamaan 4.42) dan perubahan temperatur *parcel* (persamaan 4.43), maka percepatan pergerakan udara dapat diestimasi:

$$a = \left(\frac{T_p}{T} - 1 \right) g = \left(\frac{T_{p,0} - M_m \left(\frac{gz}{C_p} - \frac{L_v}{C_p} (q_z - q_0) \right)}{T_0 e^{k \ln \left(1 - \frac{M_m g z}{T_0 C_p} \right)}} - 1 \right) g \quad (4.44)$$

Jika $T_p > T$, temperatur *parcel* udara lebih besar dari temperatur adiabatik, maka a bernilai positif, dan *parcel* bergerak ke atas sampai diperoleh kesetimbangan termal, $T_p = T$. Pada saat terjadi kesetimbangan termal, percepatan gerak *parcel* adalah nol. Kondisi ini terjadi pada z tertentu, dan menjadi batas tertinggi pergerakan *parcel* udara atau pencemar.

Temperatur terukur pada atmosfer merupakan resultan dari temperatur adiabatik dan temperatur *parcel*. Demikian juga dengan tekanan terukur, merupakan resultan dari tekanan adiabatik dan tekanan *parcel*.

$$T_{cal} = \overline{(T + T_p)} \quad (4.45)$$

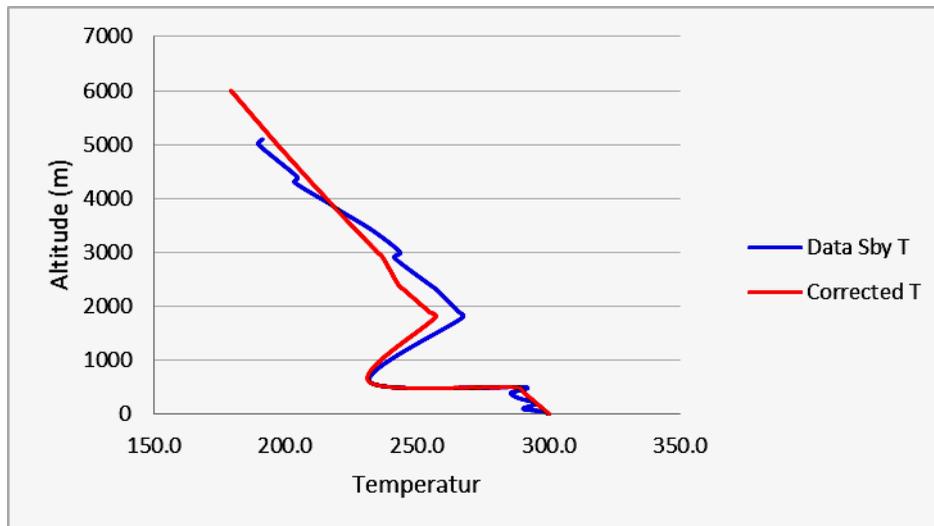
Pada ketinggian tertentu, ketika dicapai temperatur *parcel* menurun dan mencapai titik kondensasinya, maka terjadi perubahan fasa uap air menjadi titik-titik air. Dengan demikian terjadi pengurangan molekul-molekul gas dengan cepat. Pengurangan konsentrasi gas ini menyebabkan kekosongan ruang yang cepat dan dapat diukur sebagai penurunan tekanan drastis pada ketinggian tersebut.

Pada saat yang sama, perubahan menjadi fasa cair menyebabkan panas laten yang lebih besar, sehingga panas sensibel menjadi kecil. Hal ini juga terukur sebagai pengurangan temperatur yang drastis pada ketinggian ini. Kondisi ini terjadi saat $T_p = T$ dan sampai beberapa meter di atasnya tergantung jumlah molekul gas yang tersedia untuk dikondensasi. Prinsip tersebut di atas digunakan untuk kalibrasi lebih lanjut model profil temperatur sebagai fungsi altitude. Hasil penerapannya ditampilkan pada Tabel 4.14 dan Gambar 4.19a.

Tabel 4.14. Hasil kalibrasi temperatur dengan aplikasi tekanan sebagai fungsi *altitude* dan *buoyancy* dibandingkan dengan data Surabaya

Elevasi (z) m	Gravitasi m/s ²	Temperatur (K)			Tekanan (hPa)			Temp Calibrated
		Model Adiabatik terkoreksi	ISA	Data Sby	Model Adiabatik	ISA	Data Sby	

6000	9.81	179.42			63.8			179.4199
5100	9.81	195.23	254.5	191.4	100.6	527.0	100.0	195.2337
5000	9.81	197.04		189.9	105.7		100.0	197.0383
4400	9.81	208.07		204.6	141.8		150.0	208.0666
4300	9.81	209.94	260.5	203.5	148.8	595.0	150.0	209.9383
3900	9.81	217.52		217.0	180.2		190.0	217.5214
3800	9.81	219.44		219.9	188.9		200.0	219.4413
3400	9.81	227.22	266.4	233.5	227.9	670.0	250.0	227.2183
3000	9.81	235.15	268.4	243.7	274.2	697.0	300.0	235.1512
2900	9.81	237.16		241.6	287.0		300.0	237.1589
2400	9.81	247.34	272.4	255.0	360.0	753.0	390.0	247.3449
2300	9.81	249.41		257.7	376.5		400.0	249.4117
1900	9.81	257.78		265.9	449.8		475.0	257.7777
1800	9.81	259.89	276.3	267.5	470.0	812.0	500.0	259.894
600	9.81	286.07	284.2	232.2	788.3	914.0	250.0	230.2012
500	9.81	288.32		291.5	822.2		850.0	248.0979
400	9.81	290.57		285.7	857.5		762.5	265.9592
300	9.81	292.84	286.2	288.7	894.2	977.0	812.5	283.7851
200	9.81	295.12		295.4	932.3		925.0	295.7618
100	9.81	297.40		290.4	971.9		850.0	299.5956
50	9.81	298.55		298.9	992.2		1000.0	301.5146
0	9.81	299.70	288.2	299.7	1013.0	1013.0	1007.5	303.435

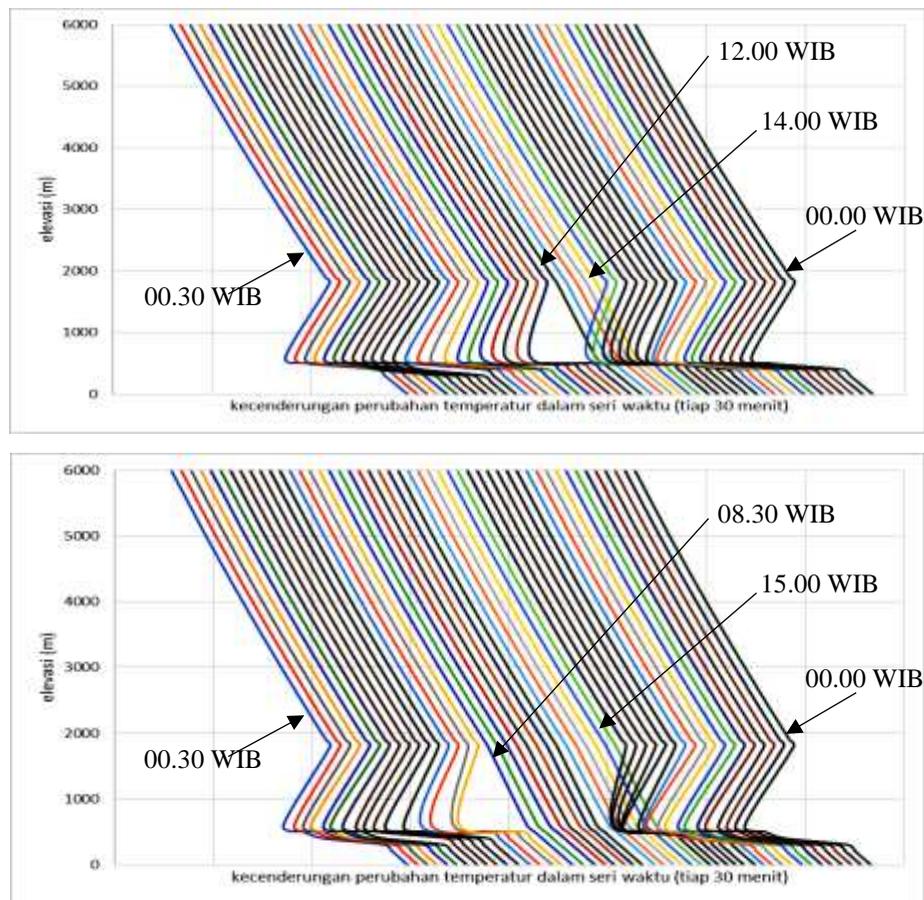


Gambar 4.19 Temperatur model terkoreksi $P=f(z)$ dan *buoyancy parcel* udara

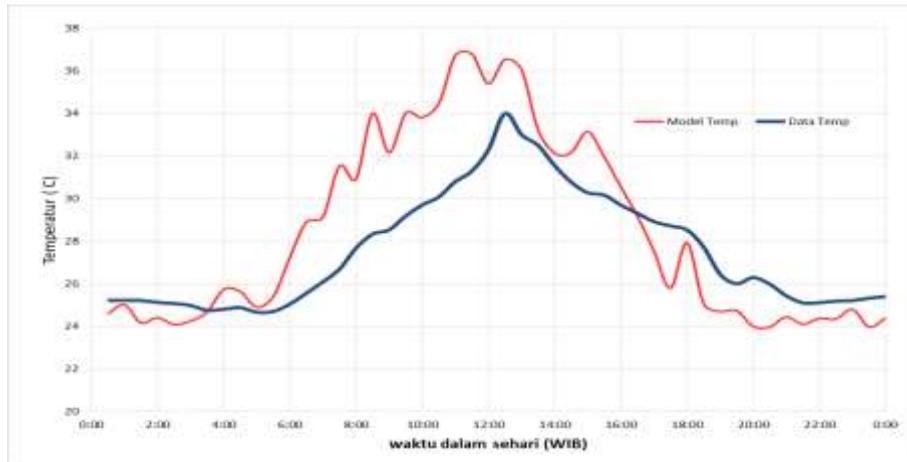
Tabel 4.14 dan Gambar 4.19 menunjukkan model terkoreksi $P = f(z)$ dan *buoyancy* memberikan hasil estimasi yang dekat dengan data temperatur atmosfer Kota Surabaya. Dengan demikian nampak bahwa perubahan temperatur atmosfer dipengaruhi oleh temperatur adiabatik dan temperatur *parcel* udara yang mengalami *buoyancy*.

4.2.3. *Developing* Perubahan Profil Temperatur Atmosfer dalam Siklus Harian

Menggunakan persamaan-persamaan 4.36, 4.44, dan 4.45 untuk perhitungan temperatur atmosfer dengan kondisi temperatur permukaan mengikuti siklus harian, maka diperoleh perubahan profil temperatur yang berubah dalam siklus harian. Perhitungan ini menggunakan asumsi temperatur permukaan sama dengan temperatur parcel udara dan temperatur adiabatik mengikuti sifat hidrostastatik. Hasil estimasi dinyatakan dalam Gambar 4.20, sedangkan nilai temperatur permukaan sebagai parameter perhitungannya dinyatakan dalam Gambar 4.21.



Gambar 4.20. Hasil estimasi profil temperatur berdasar data temperatur permukaan (atas) dan model temperatur terkoreksi (bawah)



Gambar 4.21. Profil temperatur data pengukuran permukaan dan estimasi dengan random tutupan mendung (10-40 %)

Dari kecenderungan profil temperatur terelevasi seperti gambar 4.20 dan profil temperatur permukaan seperti Gambar 4.21, dapat dijelaskan beberapa hal sebagai berikut:

- Profil temperatur permukaan hasil estimasi model dengan data pengukuran memberikan kecenderungan yang mirip, nilai-nilai yang berbeda tiap waktu karena perbedaan asumsi tutupan mendung dengan kondisi riil.
- Profil temperatur terelevasi hasil estimasi dengan temperatur permukaan diestimasi (Gambar 4.20 bawah) dan temperatur permukaan data (Gambar 4.20 atas) menunjukkan kemiripan yang baik. Pergeseran nilai karena perbedaan nilai temperatur permukaan yang nyata seperti dijelaskan point di atas.
- Pembelokan kecenderungan temperatur pada profil terelevasi terjadi ketika temperatur permukaan $> 32^{\circ}\text{C}$. Ini diperoleh dari analisis Gambar 4.20 dan 4.21, pada waktu-waktu profil temperatur menurun lurus (Gambar 4.20) sesuai elevasi bertepatan dengan temperatur permukaan $> 32^{\circ}\text{C}$ (Gambar 4.21).
- Pada siang hari ketika temperatur lebih dari 32, profil temperatur terelevasi menunjukkan slope yang konstan (tidak ada perubahan slope dengan nyata), hal ini menggambarkan kemungkinan tidak terbentuk lapisan inversi di atmosfer ketika siang hari, terutama pada rentang waktu yang ditunjukkan pada Gambar 4.21

4.3. *Mixing Height*

Hasil kalibrasi temperatur seperti pada Gambar 19 dan Tabel 16 juga menunjukkan adanya indikasi lapisan inversi. Lapisan ini ditandai dengan adanya pembalikan arah kecenderungan perubahan temperatur. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, adanya pengembunan tiba-tiba *parcel* udara pada ketinggian tertentu menyebabkan pengurangan tekanan dan temperatur secara cepat sampai ketinggian tertentu, dan kemudian kembali meningkat mengikuti profil adiabatik. Jarak dari permukaan sampai ketinggian lapisan inversi ini merupakan *mixing height*. Pada kedalaman ini, terjadi potensi pencampuran *parcel* udara termasuk pencemar udara dengan atmosfer ambien.

Dengan demikian penentuan *mixing height* pada proses ini dapat didasarkan pada perubahan temperatur *parcel* udara terhadap temperatur adiabatik. Pergerakan *parcel* akan terhenti ketika mencapai ketinggian maksimum ($a = 0$), sehingga altitude pada kondisi tersebut (z pada saat $a = 0$) merupakan ketinggian batas pergerakan *parcel* udara yang diestimasi sebagai *mixing height* (MH) atau tinggi pencampuran *parcel* udara dengan atmosfer. Persamaan tersebut dituliskan berdasarkan persamaan 4.44 hasil analisis *buoyancy*, menjadi:

$$T_p = T$$

$$\frac{T_{p,0} - M_m \left(\frac{gz}{c_p} - \frac{L_v}{c_p} (q_z - q_0) \right)}{T_0 e^{k \ln \left(1 - \frac{M_m g z}{T_0 c_p} \right)}} = 1$$

$$T_{p,0} - M_m \frac{gz}{c_p} + M_m \frac{L_v}{c_p} (q_z - q_0) = T_0 e^{k \ln \left(1 - \frac{M_m g z}{T_0 c_p} \right)} \quad (4.46)$$

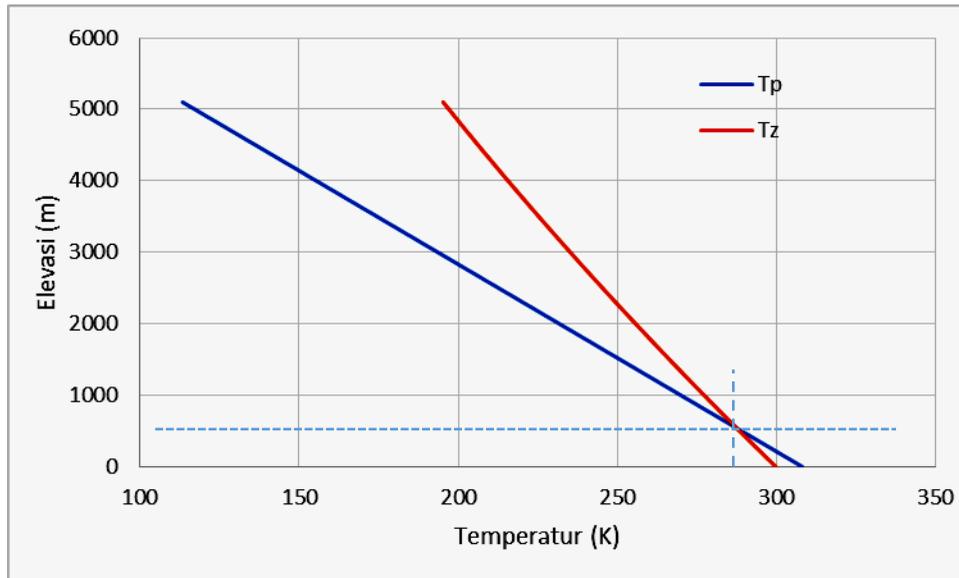
Salah satu metode untuk menyelesaikan persamaan di atas adalah analisis grafik. Kedua ruas persamaan di atas menyatakan T_p pada ruas kiri, dan T pada ruas kanan. Pada kondisi yang memungkinkan, dimana $T_p > T$ pada permukaan, akan didapatkan perpotongan grafik pada z tertentu, karena $dT_p/dz > dT/dz$. Perpotongan kurva T_p dan T sebagai fungsi altitude (z) menunjukkan ketinggian *mixing height* estimasi. Sebagai contoh perhitungan model adiabatik terkalibrasi dan T_p yang dimodelkan untuk Kota Surabaya pada 1 Januari pukul 00.00, dapat dilihat pada Tabel 4.15, dan analisis perpotongan grafik T_p dan T dapat dilihat pada Gambar 20.

Berdasarkan analisis grafik, estimasi MH pada 1 Januari 2010 pukul 00.00 menunjukkan kisaran 500-600 m *altitude*. Hasil ini cukup konsisten dengan profil

data temperatur Surabaya dan Profil temperatur terkoreksi buoyancy. Pada kedua profil tersebut terjadi inversi temperatur sekitar mulai 500 m sampai 600 m altitude. Setelah ketinggian ini profil temperatur akan kembali mengikuti penurunan temperatur atmosfer adiabatik. *Parcel* udara tidak lagi berpengaruh setelah terjadi kondensasi sempurna, sehingga tidak mempengaruhi profil temperatur di bagian atas *mixing height*.

Tabel 4.15. Estimasi mixing height berdasar data Surabaya dan model terkalibrasi, 1 Januari 2010 pukul 00.00

Elevasi (z) m	Gravitasi m/s ²	Temperatur (K)			
		Model Adiabatik terkoreksi	Tp	ISA	Data Sby
6000	9.81	179.42	79.03		
5100	9.81	195.23	113.37	254.5	191.4
5000	9.81	197.04	117.19		189.9
4400	9.81	208.07	140.09		204.6
4300	9.81	209.94	143.90	260.5	203.5
3900	9.81	217.52	159.17		217.0
3800	9.81	219.44	162.98		219.9
3400	9.81	227.22	178.25	266.4	233.5
3000	9.81	235.15	193.51	268.4	243.7
2900	9.81	237.16	197.33		241.6
2400	9.81	247.34	216.41	272.4	255.0
2300	9.81	249.41	220.23		257.7
1900	9.81	257.78	235.49		265.9
1800	9.81	259.89	239.31	276.3	267.5
600	9.81	286.07	285.10	284.2	232.2
500	9.81	288.32	288.92		291.5
400	9.81	290.57	292.74		285.7
300	9.81	292.84	296.55	286.2	288.7
200	9.81	295.12	300.37		295.4
100	9.81	297.40	304.18		290.4
50	9.81	298.55	306.09		298.9
0	9.81	299.70	308.00	288.2	299.7



Gambar 4.22. Analisis grafik untuk mengestimasi mixing height (1 Januari 2010, 00:00)

Dari analisis persamaan dan grafik pada Gambar 4.22, dapat dilihat bahwa perbedaan yang besar antara T_p dan T dengan nilai $T_p > T$ berpotensi menghasilkan *mixing height* yang lebih tinggi.

4.3.1. Pengaruh kuat radiasi global terhadap suhu permukaan atmosfer/tekanan, profil temperatur/tekanan, dan *mixing height*.

Pengaruh intensitas radiasi terhadap temperatur *parcel* (T_p) dan temperatur permukaan atmosfer yang merupakan resultan T_p dan T . Analisis lebih lanjut pada *mixing height* menunjukkan perubahan suhu *parcel* mempengaruhi ketinggian MH. Secara umum, hubungan temperatur (T) dengan energi radiasi yang diterima suatu sistem dapat didekati dengan prinsip radiasi benda hitam Planck dan hukum Stefan-Boltzmann.

Pada sistem matahari sebagai sumber radiasi dan bumi sebagai penerima dan sekaligus pengemisi sekunder, prinsip benda hitam Planck dan hukum Stefan-Boltzmann tersebut dapat diterapkan. Menggunakan persamaan 2.9 dan memasukkan T permukaan matahari sebesar 5783 K, dan radius matahari (R) = 6.96×10^5 km dan jarak bumi-matahari (r) = 1.5×10^8 km; maka intensitas radiasi total (S) dari matahari adalah:

$$S = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \sigma T^4 = \left(\frac{6.96}{1.5 \times 10^3}\right)^2 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \times (5783 K)^4 = 1368 \frac{W}{m^2}$$

Perhitungan ini dengan asumsi bahwa intensitas yang diterima atmosfer bumi ini, diemisikan kembali dalam bentuk temperatur. Temperatur emisi selalu berkesetimbangan dengan intensitas radiasi yang diterima. Pendekatan ini dinyatakan dalam temperatur efektif-emisi.

Dalam kenyataannya, dari seluruh radiasi matahari (S) yang sampai ke atmosfer bumi, sebagian dipantulkan kembali secara langsung (*albedo* atmosfer, A) sebesar SA ; dan sebagian yang lain sebesar $S(1-A)$ diteruskan melalui atmosfer sampai permukaan bumi. Jika diasumsikan bumi sebagai bola sempurna, maka separoh bagian bumi menerima proyeksi radiasi sebesar $S(1-A)$ dikalikan dengan luas penampang bumi. Intensitas yang diterima tersebut, didistribusikan ke seluruh permukaan bumi, disebut rata-rata global intensitas efektif. Besaran ini akan sebanding dengan temperatur efektif-emisi (T_e). Sehingga:

$$S_b = \frac{\pi R_b^2 S(1-A)}{4\pi R_b^2} = \sigma T_e^4 \quad (4.47)$$

$$\sigma T_e^4 = \frac{S(1-A)}{4} \quad (4.48)$$

Tampak bahwa intensitas efektif yang diterima rata-rata permukaan bumi adalah sekitar $S/4$ atau sekitar 342 Wm^{-2} . Beberapa teori menyatakan *albedo* rata-rata bumi adalah 0.3 sehingga diperoleh T_e sebesar 255 K.

4.3.2. *Budget* energi pada sistem atmosfer bumi dan efek rumah kaca

Dari sejumlah energi radiasi yang masuk ke atmosfer bumi (Kiehl & Trenberth, 1997) dalam (Sportisse, 2008):

- 107 Wm^{-2} dipantulkan kembali ke luar atmosfer karena *albedo* atmosfer planet (A)
- 77 Wm^{-2} dipantulkan kembali oleh aerosol dan awan
- 67 Wm^{-2} diabsorpsi oleh gas dan aerosol dan awan (a_s)
- 168 Wm^{-2} dihamburkan dan diserap oleh bumi
- 30 Wm^{-2} direfleksikan oleh permukaan bumi dan dihamburkan ke luar atmosfer

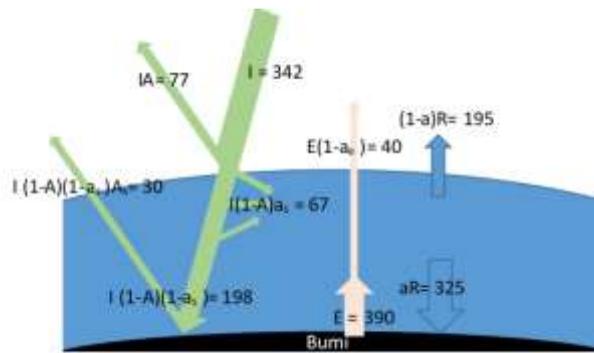
Sedangkan energi yang masuk dan diserap permukaan bumi dan panas laten bumi:

- 390 Wm^{-2} diemisikan bumi (E) kembali ke atmosfer (350 Wm^{-2} diabsorpsi oleh gas, aerosol, dan awan; 40 Wm^{-2} dilepas ke luar atmosfer (atmospheric window))
- 102 Wm^{-2} panas laten bumi dilepas ke atmosfer

Dan energi yang diserap oleh gas, aerosol, dan awan:

- 195 Wm^{-2} dilepas kembali ke atmosfer bagian atas atau luar atmosfer
- 324 Wm^{-2} diemisikan kembali ke permukaan bumi dan diabsorpsi oleh bumi (aR)

Budget energi ini secara berkesetimbangan mempengaruhi temperatur atmosfer permukaan bumi. Proses absorpsi dan emisi energi oleh gas, aerosol, dan awan ini merupakan dasar dari penjelasan efek rumah kaca. *Budget* energi ini secara skematis dan ringkas dapat digambarkan dalam Toy Model pada Gambar 4.23 berikut:



Gambar 4.23 Toy Model untuk efek rumah kaca (Sportisse, 2008) telah dimodifikasi

Dari skema tersebut diperoleh persamaan analisis (Sportisse, 2008) pada permukaan dekat dengan bumi:

$$I(1 - A)(1 - a_s) + aR = E = \sigma T^4$$

$$I(1 - A)a_s + a_e E = R$$

Sehingga

$$I(1 - A)(1 - a_s) + a(I(1 - A)a_s + a_e E) = E$$

$$I(1 - A)((1 - a_s) + aa_s) = E(1 - aa_e)$$

$$E = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} I(1 - A) = \sigma T^4 \quad (4.49)$$

Karena semua energi yang diterima penampang bumi didistribusi ke seluruh permukaan bumi, maka analog dengan persamaan T_e , diperoleh:

$$E = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} \frac{I(1-A)}{4} = \sigma T^4 \quad (4.50)$$

Atau dengan substitusi persamaan 4.48, diperoleh hubungan temperatur surface (T) dengan temperatur efektif.

$$T^4 = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} \frac{I(1-A)}{4\sigma} = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} T_e^4 \quad (4.51)$$

Dari gambar model toy termodifikasi di atas, dapat diperkirakan nilai-nilai a_s , a_e , dan a sebagai berikut:

$$a_s = \frac{67}{342-77} = \frac{67}{265}, \quad a_e = \frac{390-40}{390} = \frac{350}{390}, \quad a = \frac{324}{324+195} = \frac{324}{519}$$

Dengan demikian diperoleh

$$T^4 = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} T_e^4 = \frac{\left(1-\frac{67}{265}\right)+\frac{324}{519}\frac{67}{265}}{1-\frac{324}{519}\frac{350}{390}} T_e^4 = 2.057836T_e^4$$

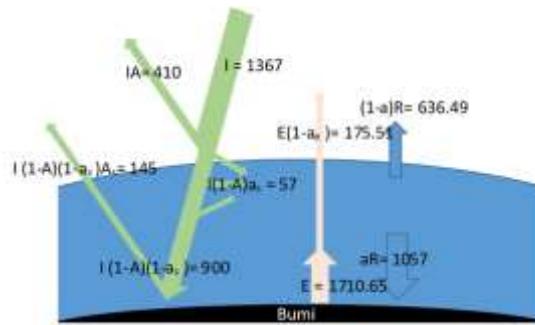
Dengan mengambil nilai $T_e = 255$ K, maka diperoleh temperatur atmosfer permukaan sebesar $T = 305$ K atau sekitar 32 °C.

4.3.3. Aplikasi model *budget* energi, pada perubahan temperatur permukaan maksimum di Surabaya

Pada bagian atmosfer permukaan bawah nilai intensitas dimonitoring pada siang hari sekitar $700 - 900$ W/m². Data ini ditampilkan pada Gambar 4.5. Dalam teori *budget* energi radiasi yang diterima atmosfer bumi, GRAD yang termonitor di bagian bawah adalah sisa dari radiasi yang memantul balik karena *albedo* atmosfer atas, dan absorpsi oleh atmosfer. Dengan demikian *albedo* atmosfer atas dan absorpsi oleh gas, aerosol, dan awan sebesar $665 - 465$ W/m². Mengambil *albedo* atmosfer atas rata-rata global sebesar 0.3, maka absorpsi oleh atmosfer adalah sekitar 255.5 sampai 55.5 W/m².

Kedua nilai ini digunakan untuk menentukan hubungannya dengan temperatur maksimum yang terukur di permukaan. Pada kondisi GRAD maksimum terbesar (900 W/m²) skema *budget* radiasi didekati dengan model seperti pada Gambar 4.24. Dari skema tersebut, dapat dituliskan beberapa nilai parameter yaitu absorpsi (a_s), emisi dari bumi (a_e) dan diemisikan kembali dari atmosfer (a). Nilai-nilai parameter tersebut adalah:

$$a_s = \frac{57}{1367-410} = \frac{57}{957}, \quad a_e = \frac{1710.65-175.51}{1710.65}, \quad a = \frac{1057.65}{1057.65+636.49}$$

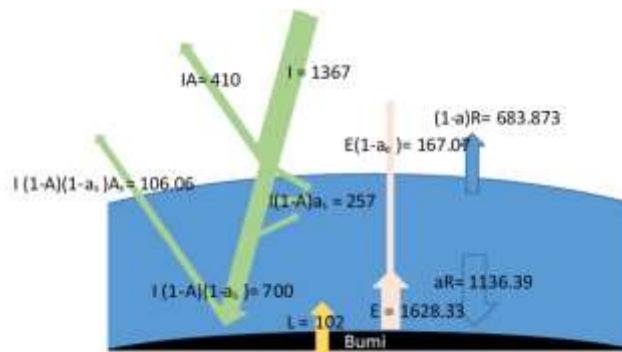


Gambar 4.24. Skema model Toy, untuk *budget* radiasi termonitoring maksimum tinggi (900 W/m^2)

Dengan demikian pada saat sangat cerah, dan GRAD termonitor di atmosfer bawah sekitar 900 W/m^2 , maka suhu permukaan (T) diperoleh dari model menggunakan persamaan 4.51 adalah:

$$T^4 = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} T_e^4 = \frac{\left(\frac{1-57}{957}\right) + \frac{1057.65 \cdot 57}{1694.14957}}{1 - \frac{1057.65 \cdot 1535.14}{1694.141710.65}} T_e^4 = 2.223113 T_e^4$$

Dengan mengambil nilai $T_e = 255 \text{ K}$, maka diperoleh temperatur atmosfer permukaan sebesar $T = 311,37 \text{ K}$ atau sekitar $38,24 \text{ }^\circ\text{C}$. Perhitungan yang sama diterapkan pada kondisi atmosfer dengan data GRAD permukaan 700 W/m^2 . Pada nilai GRAD tersebut, skema *budget* energi ditampilkan pada Gambar 4.25. Analisis *budget* energi tersebut menghasilkan nilai $a_s = 257/957$.



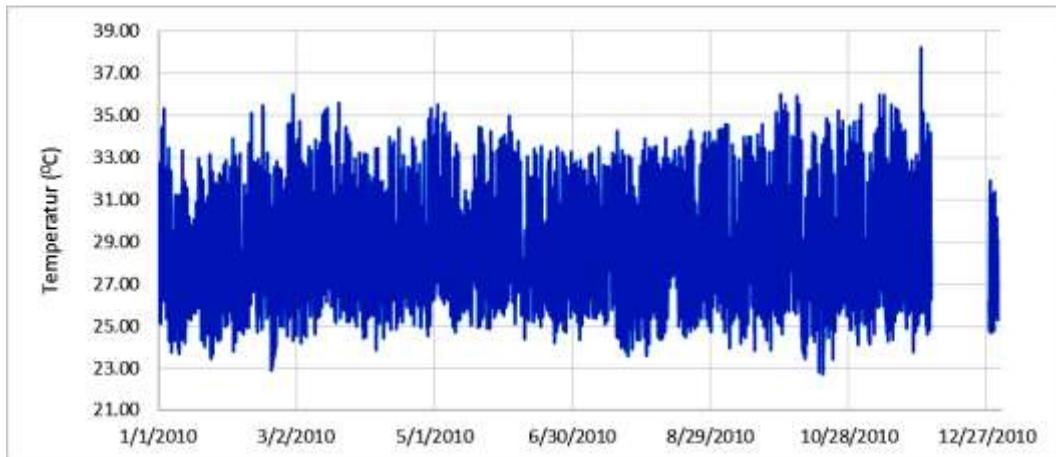
Gambar 4.25 Skema model Toy, untuk *budget* radiasi termonitoring maksimum rendah (700 W/m^2)

Dengan demikian, pada saat intensitas matahari sekitar 700 W/m^2 , hubungan T_e dengan T permukaan dinyatakan dalam persamaan:

$$T^4 = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} T_e^4 = 2.044568 T_e^4$$

Memasukkan nilai T_e sebesar 255 K , maka diperoleh nilai $T = 304.92 \text{ K} = 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

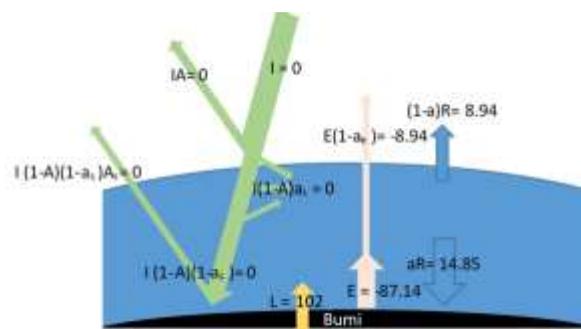
Berdasarkan perhitungan menggunakan model *budget* energi dan efek rumah kaca untuk atmosfer Surabaya di atas, diperoleh temperatur maksimum untuk Surabaya berkisar antara 31,8 – 38,3 °C. Hasil ini cukup dekat dengan profil rata-rata perubahan temperatur data monitoring kota Surabaya, pada kondisi cerah, berdasarkan suhu maksimum yang terukur (30 – 36) seperti terlihat pada Gambar 4.26 berikut:



Gambar 4.26 Profil temperatur hasil monitoring kota Surabaya tahun 2010

4.3.4. Model temperatur minimum atmosfer permukaan

Pada waktu tidak ada radiasi (saat malam), maka kesetimbangan *budget* energi lokal di atmosfer permukaan akan mengalami pergeseran/perubahan. Sumber energi yang masuk ke atmosfer hanya berasal dari emisi bumi, panas laten bumi, dan emisi dari gas-gas rumah kaca seperti pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Skema model Toy, untuk *budget* radiasi termonitoring minimum (0 W/m²)

Semua panas laten dari bumi akan diserap (diabsorpsi) oleh gas, awan, di atmosfer sehingga $a_s = 1$. Dengan demikian kesetimbangan yang terbentuk sesuai skema di atas adalah:

$$a_s = \frac{102}{102}, \quad a_e = \frac{-87.14+8.94}{-87.14}, \quad a = \frac{14.85}{14.85+8.94}$$

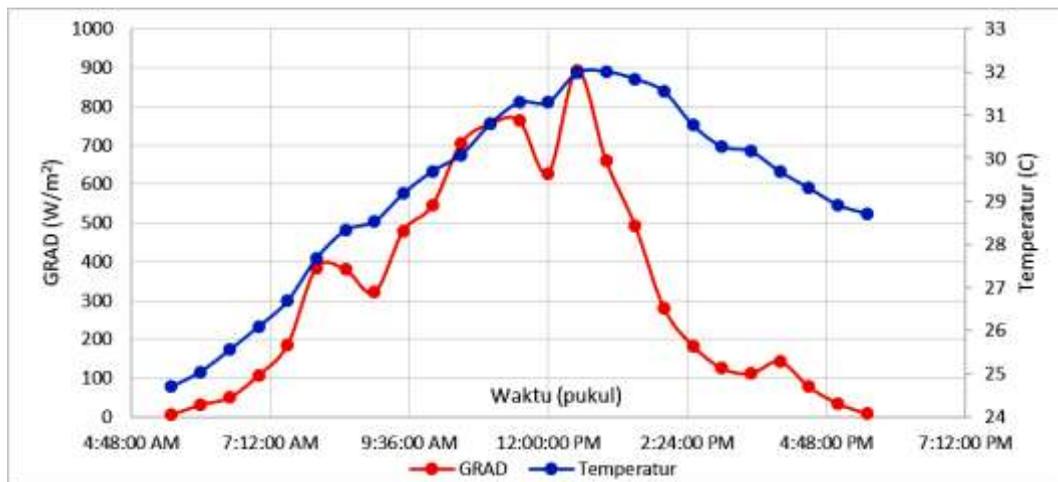
Dengan demikian pada saat gelap (malam), dan GRAD termonitor di atmosfer bawah adalah 0 W/m^2 , maka suhu permukaan (T) diperoleh dari model ini adalah:

$$T^4 = \frac{(1-a_s)+aa_s}{1-aa_e} T_e^4 = \frac{(1-1)+\frac{14.85}{23.8}1}{1-\frac{14.85}{23.8}\frac{78.2}{87.14}} T_e^4 = 1.126452T_e^4$$

Dengan mengambil nilai $T_e = 255 \text{ K}$, maka diperoleh temperatur minimum atmosfer permukaan sebesar $T = 287,24 \text{ K}$ atau sekitar $14,11 \text{ }^\circ\text{C}$. Jika diasumsikan temperatur permukaan berada pada elevasi nol, maka nilai-nilai T maksimum dan minimum hasil model *budget* radiasi tersebut dapat digunakan sebagai T_p dalam inputan model yang lain.

4.3.5. Profil intensitas radiasi dan temperatur tergantung waktu.

Temperatur atmosfer dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi sesuai waktu peredaran matahari. Parameter intensitas dan temperatur ini dengan demikian berubah dengan waktu. Sebagai contoh data monitoring GRAD dan temperatur pada 1 Januari 2010 di Kota Surabaya adalah seperti pada Gambar 4.28 berikut:

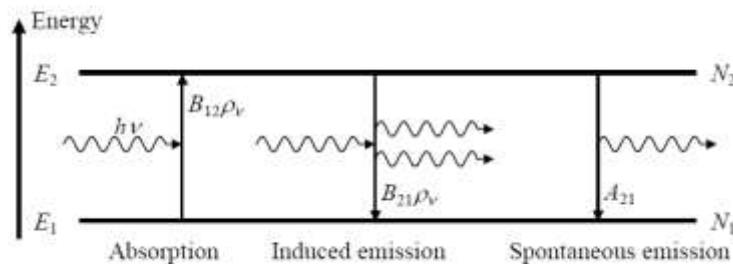


Gambar 4.28 Temperatur dan GRAD atmosfer permukaan terukur pada 1 Januari 2010

Setelah mencapai maksimum pada zenith, temperatur atmosfer permukaan menurun sampai sekitar 9.30 pm. Dengan demikian ada sisa emisi sekitar 4 jam

setelah tidak ada sumber radiasi matahari, sehingga temperatur atmosfer permukaan kembali bernilai minimum. Dalam konsep radiasi benda hitam, benda yang menerima energi radiasi mengemisikan kembali energi yang diterimanya dalam dua mekanisme, yaitu emisi/radiasi induksi dan emisi/radiasi spontan. Emisi induksi terjadi sesaat ketika benda tersebut menerima energi, karena pengaruh langsung energi yang diterima. Sedangkan emisi spontan karena emisi yang dihasilkan penurunan tingkat energi atom-atom ketika kembali ke level semula. Radiasi spontan terjadi setelah materi penerima radiasi tereksitasi ke level lebih tinggi, dengan demikian ada penundaan emisi jika dihitung dari waktu awal benda menerima radiasi. Radiasi spontan masih terjadi walaupun benda sudah tidak lagi menerima radiasi, sampai materi benar-benar kembali ke level *ground state*.

Secara umum hubungan antara radiasi emisi induksi dan emisi spontan dinyatakan dalam Gambar 4.29 berikut:



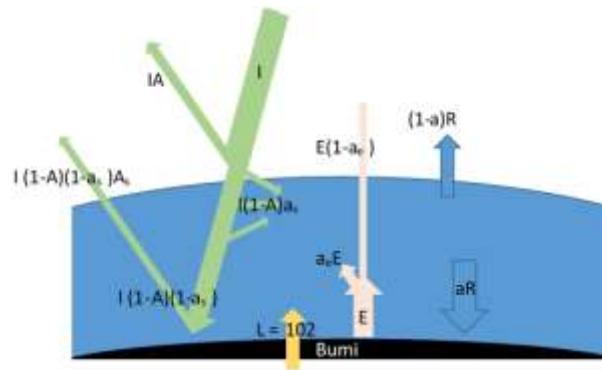
Gambar 4.29 Absorpsi Energi, Emisi Induksi dan Emisi Spontan (Fruede, 2006)

Dari Gambar 4.29 dapat dijelaskan intensitas energi yang diabsorpsi oleh material (benda hitam), digunakan untuk menaikkan tingkat energi molekulernya dari E_1 menjadi E_2 . Pada saat yang sama secara berkesetimbangan molekul yang berada di level E_2 sebagian kembali ke level E_1 dengan mengemisikan kembali energi yang diterimanya. Emisi inilah yang disebut sebagai emisi induksi, dan terukur sebagai temperatur. Kecepatan emisi induksi ini mula-mula kecil dan makin besar saat energi diserap semakin besar. Dan saat tercapai temperatur emisi maksimum, maka kecepatan emisi juga maksimum. Fluks molekul yang tereksitasi sama dengan fluks molekul yang kembali ke *ground state*. Ketika intensitas energi yang diabsorpsi kembali nol, sisa energi akan diemisikan oleh molekul-molekul yang masih berada di level E_2 ketika kembali ke *groundstate* (E_1) secara spontan. Emisi spontan ini

akan benar-benar berhenti ketika secara molekuler semua materi telah kembali ke level E_1 .

4.3.6. Model temperatur atmosfer karena Emisi induksi menggunakan konsep *budget* energi

Pada atmosfer permukaan, temperatur terukur merupakan akumulasi emisi spontan dan emisi induksi. Emisi ini berupa radiasi energi dengan panjang gelombang infra merah. Emisi induksi menyebabkan temperatur berubah sebanding dengan intensitas radiasi yang diabsorpsi oleh atmosfer



Gambar 4.30. Generalisasi konsep *budget* energi di atmosfer permukaan bumi

Generalisasi model seperti Gambar 4.30 ini menghasilkan

$$a_s = \frac{I(1-A) - I_{mon}}{I(1-A)}, \quad a_e = 0.8974, \quad a = 0.6243$$

Pada persamaan tersebut, $I = 1367 \text{ W/m}^2$, $I_{mon} = \text{GRAD}$ termonitor di permukaan atmosfer, dan $A = \text{albedo}$ global sekitar 0.3 atau dapat juga menggunakan *albedo* lokal tergantung waktu sebagai koreksi. Menggunakan persamaan korelasi T dengan T_e , dimana $T_e = 255 \text{ K}$, maka:

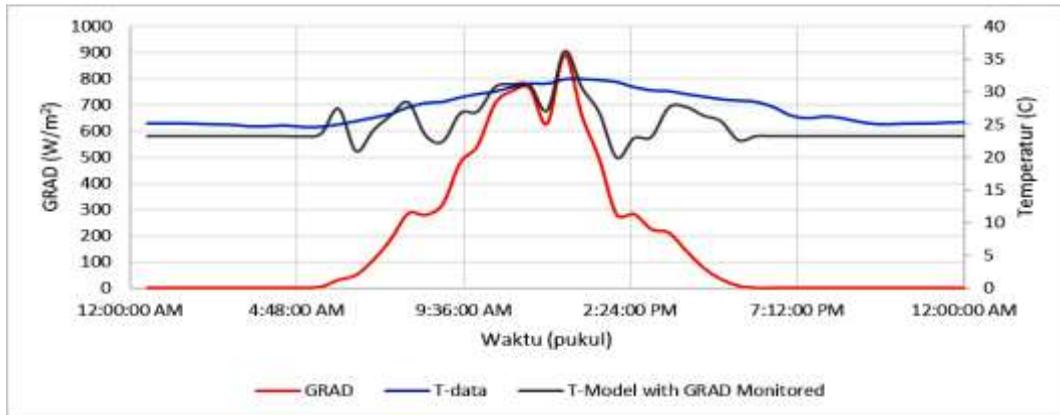
$$T^4 = \frac{(1-a_s) + a a_s}{1 - a a_e} 255^4$$

Sebagai contoh untuk model tanggal 1 Januari 2010, menggunakan *albedo* estimasi tergantung sudut zenith matahari dan GRAD data monitoring, dihasilkan nilai-nilai seperti pada Tabel 4.16 berikut:

Tabel 4.16 Hasil estimasi temperatur berdasarkan GRAD monitoring untuk Surabaya 1 Januari 2010

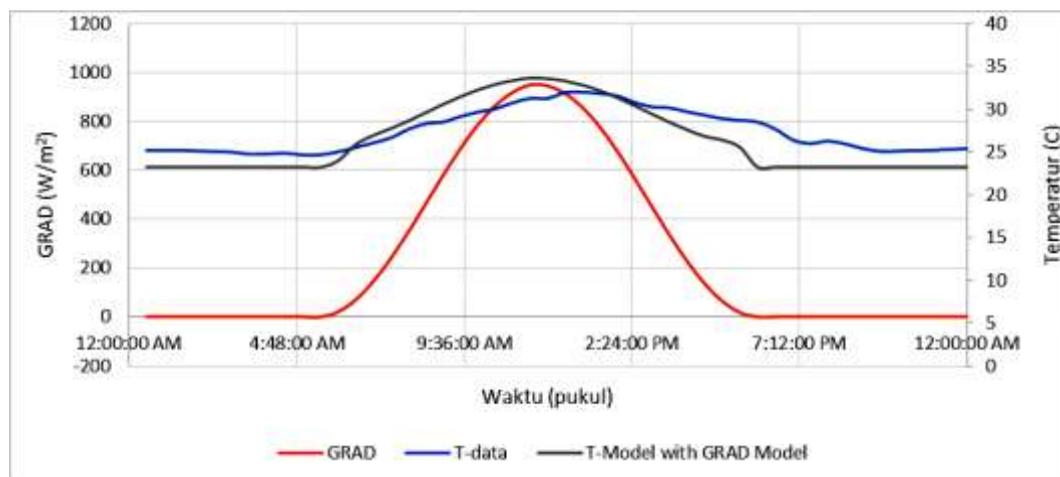
Waktu	zenith	est-albedo	GRAD- monitored	as	T-model	T-data
5:30:00 AM	84.34125	0.991735781	5.4882	0.514198	23.6479	24.705
6:00:00 AM	77.73798	0.96165956	31.352	0.401809	27.45687	25.05
6:30:00 AM	71.11938	0.910992001	49.877	0.590077	20.99087	25.559
7:00:00 AM	64.50061	0.84246818	107.85	0.499178	24.16546	26.093
7:30:00 AM	57.89879	0.759957009	186.05	0.433014	26.41381	26.69
8:00:00 AM	51.33557	0.668225821	385.11	0.150871	35.47463	27.679
8:30:00 AM	44.84148	0.572648392	379.85	0.349783	29.17213	28.333
9:00:00 AM	38.46393	0.478874539	321.47	0.548737	22.44732	28.536
9:30:00 AM	32.28353	0.392481893	479.69	0.422392	26.77008	29.187
10:00:00 AM	26.44957	0.318631522	545.44	0.414406	27.03711	29.705
10:30:00 AM	21.25915	0.261748892	705.94	0.300488	30.77083	30.084
11:00:00 AM	17.30985	0.225250057	755.01	0.28711	31.20039	30.799
11:30:00 AM	15.58177	0.211330158	764.23	0.29114	31.07117	31.299
12:00:00 PM	16.77793	0.220827429	628.71	0.409733	27.19303	31.307
12:30:00 PM	20.38907	0.253171199	893.16	0.125138	36.26232	31.984
1:00:00 PM	25.40257	0.306417146	660.51	0.303353	30.6786	32.018
1:30:00 PM	31.14433	0.377367598	493.82	0.419812	26.85642	31.843
2:00:00 PM	37.27418	0.461769386	280.47	0.618803	19.96591	31.554
2:30:00 PM	43.62281	0.554576912	183.92	0.697944	17.08511	30.773
3:00:00 PM	50.10021	0.650264027	125.31	0.737894	15.5977	30.279
3:30:00 PM	56.65429	0.743165268	112.15	0.680569	17.72493	30.165
4:00:00 PM	63.25214	0.827825187	142.78	0.393363	27.73735	29.696
4:30:00 PM	69.87085	0.899333996	77.988	0.43327	26.40523	29.316
5:00:00 PM	76.4927	0.953628623	34.343	0.458224	25.56312	28.922
5:30:00 PM	83.10237	0.986298146	8.5513	0.543454	22.6319	28.718

Menggambarkan nilai-nilai dari Tabel 4.16 tersebut ke dalam grafik, diperoleh profil perubahan temperatur permukaan yang dapat dibandingkan dengan temperatur dan GRAD pengukuran seperti pada Gambar 4.31. Pola temperatur hasil model berhubungan dengan intensitas radiasi (GRAD) terukur. Hasil estimasi ini cukup dekat dengan range temperatur hasil pengukuran harian. Dengan demikian persamaan yang digunakan dalam estimasi temperatur ini dapat digunakan untuk model selanjutnya.



Gambar 4.31. Profil temperatur permukaan dimodelkan dari data monitoring GRAD, dan data monitoring temperatur tiap 30 menit selama sehari

Lebih lanjut, dilakukan pengujian dengan mengestimasi temperatur berdasarkan GRAD yang diperoleh dari model sebelumnya. Dengan nilai GRAD model dan *albedo* yang diestimasi dari sudut zenith matahari, maka diperoleh profil temperatur permukaan sebagai fungsi waktu seperti pada Gambar 4.32 berikut:



Gambar 4.32. Profil temperatur permukaan dimodelkan dari model-GRAD, dan data monitoring temperatur tiap 30 menit selama sehari

Estimasi ini juga memberikan nilai yang cukup dekat dengan data pengukuran temperatur harian. Namun demikian masih diperlukan uji konsistensi hasil dengan menerapkan data-data harian lainnya selama 4 tahun. Persamaan-persamaan untuk estimasi yang telah dihasilkan di atas, merupakan kerangka yang cukup baik untuk proses pemodelan selanjutnya.

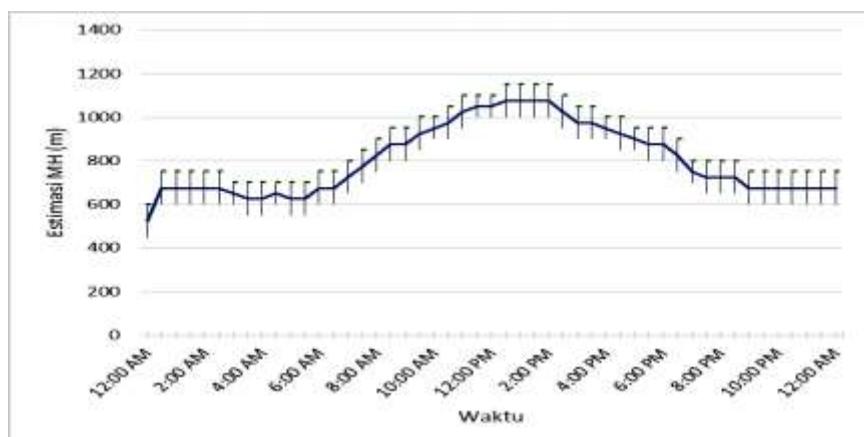
4.3.7. Perubahan profil temperatur dan mixing height bergantung waktu

Sebelumnya telah dijelaskan bahwa profil temperatur atmosfer permukaan merupakan resultan *lapse rate* temperatur adiabatik dan temperatur *parcel*. Dan penentuan *mixing height* dapat didasarkan pada perubahan temperatur *parcel* udara karena buoyancy terhadap temperatur adiabatik. Pada atmosfer bawah dekat permukaan, temperatur terukur lebih dominan menunjukkan temperatur *parcel* udara bawah. Makin ke atas, temperatur adiabatik semakin dominan. Jika diasumsikan kedua temperatur ini dipisahkan, maka diperoleh dua pola penurunan temperatur seperti pada Gambar 4.22. *Lapse rate* adiabatik lebih kecil dibanding dengan *lapse rate parcel*. Sedang temperatur awal adiabatik lebih rendah dibanding dengan temperatur awal *parcel*. Dengan demikian maka pada ketinggian tertentu kedua temperatur ini mencapai nilai yang sama, dinamakan *mixing height*.

Menggunakan hasil-hasil perhitungan

1. temperatur *parcel* berdasarkan *budget* energi radiasi dengan GRAD-model,
2. temperatur adiabatik menggunakan prinsip kesetimbangan gaya dan termodinamika, dan
3. prinsip buoyancy untuk menentukan tinggi perpotongan kedua temperatur *parcel* dan adiabatik

maka dengan memanfaatkan *spreadsheet* excel, didapatkan hasil perubahan profil temperatur vertikal bergantung waktu dan perubahan *mixing height*-nya. Perhitungan lengkap ada di file excel terpisah dari naskah ini. Sedang resume *mixing height* dapat dilihat pada Gambar 4.33.



Gambar 4.33 Model Evolusi Mixing Height dalam 24 jam berdasarkan T-data monitoring

Sesuai dengan teori bahwa mixing height di atmosfer malam dan siang akan berbeda. Pada siang hari MH lebih tinggi dari pada MH pada malam hari. Hasil model seperti pada Gambar 4.33 menunjukkan hal yang demikian. Sehingga secara prinsip hasil ini cukup baik untuk menggambarkan kondisi *mixing height* di satu waktu. Perlu dilakukan uji lebih lanjut konsistensi hasil dan ketepatan model dengan membandingkannya terhadap data monitoring pada waktu yang sama. Dan mengujinya juga terhadap data-data monitoring waktu-waktu yang lain.

Hasil dari model MH ini kemudian digunakan sebagai dasar penentuan volume diapersi dan sebagai batas ketinggian maksimum bagi pencemar terdispersi. Aplikasi formula dan hasil penentuan MH ini lebih lanjut dijadikan inputan untuk memodelkan dispersi pencemar di atmosfer. Secara berurutan persamaan-persamaan yang dihasilkan dari pemodelan tekanan, temperatur, dan *mixing height* akan disubstitusikan pada persamaan-persamaan yang dihasilkan pada analisis difusi dan adveksi pencemar di atmosfer pada sub bab berikutnya.

4.4. Formulasi Hukum Konservasi Zat dalam Struktur Atmosfer

Meskipun temperatur merupakan akumulasi sejumlah energi kinetik dari partikel-partikel diskrit dalam zat (merupakan fungsi diskrit dari posisi, dalam skala atomik/mikroskopik), namun dalam skala makroskopik (karena densitas partikel relatif tinggi) dapat diasumsikan temperatur sebagai fungsi kontinu. Demikian juga untuk sifat-sifat intensif lain dari suatu zat. Notasi untuk menyatakan fungsi kontinu (C^∞)

Aliran udara (arah dan kecepatan angin) di atmosfer secara prinsip dipengaruhi oleh perbedaan tekanan titik-titik referensi. Arah pergerakan angin ditentukan gradien tekanan. Angin bergerak dari bagian atmosfer bertekanan lebih tinggi ke bagian lain yang bertekanan lebih rendah (arah). Besar gradien menentukan kecepatan alirannya. Dengan demikian distribusi tekanan baik secara total maupun secara parsial sangat menentukan pola aliran atmosfer ini. Perbedaan-perbedaan tekanan tersebut dapat terjadi antara lain disebabkan oleh:

1. Siklus rotasi bumi, dan revolusinya. Rotasi dan revolusi bumi menyebabkan pemanasan bergantian pada bagian-bagian permukaan bumi. Dengan

demikian maka suhu permukaan menjadi bervariasi, menyebabkan variasi kerapatan udara dan variasi tekanan atmosfer.

2. Perbedaan elevasi (untuk aliran vertikal dan *bouyancy*). Adanya radiasi (pantulan, serapan oleh permukaan), panas permukaan (panas laten bumi), dan komposisi/kerapatan gas maka distribusi temperatur berubah karena elevasi. Pada atmosfer bawah (troposfer) temperatur menurun mengikuti ketinggian.
3. Adanya sumber panas lokal, seperti energi yang dilepas dari aktivitas perkotaan, industri, kebakaran hutan, dll. Panas-panas lokal ini menyebabkan perubahan temperatur dan kerapatan atmosfer di sekitar sumber panas.
4. Adanya *obstacle* atau *barier*. Penghalang aliran udara ini akan memaksa udara berbelok arah dan segera untuk kembali kearah normalnya sesuai dengan arah gradien tekanan.

Memperhatikan hal-hal tersebut, untuk mengestimasi pola aliran atmosfer perkotaan maka beberapa asumsi dibangun untuk menyederhanakan persoalan. Asumsi-asumsi tersebut antara lain dan konsekuensinya adalah:

1. Aliran horisontal yang terjadi karena hal-hal tersebut adalah *incompressible*. Aliran ini ketika terinduksi perubahan tekanan atau temperatur tidak mengalami perubahan densitas yang signifikan. Mengikuti asumsi ini, maka aliran angin dianggap horisontal saja, dan densitas udara pada elevasi yang sama dianggap sama.
2. Strata tekanan vertikal yang mengikuti prinsip hidrodinamik tidak menyebabkan aliran vertikal secara signifikan (karena adanya kesetimbangan gaya pada volume kontrol). Aliran vertikal yang terjadi didekati dengan prinsip *bouyancy* (pengapungan). Perbedaan tekanan lebih disebabkan oleh perubahan volume (densitas) dan bersifat lokal (terjadi pada *parcel* udara) karena perbedaan temperatur yang melebihi prinsip hidrodinamik. Densitas atmosfer merupakan fungsi suhu, sehingga aliran vertikal ini juga merupakan fungsi suhu. Aliran vertikal *parcel* udara ini akan berhenti jika suhu *parcel* sama dengan suhu atmosfer adiabatik, pada

ketinggian tertentu. Ketinggian ini yang diasumsikan sebagai batas *mixing height*.

Pola aliran horisontal dengan prinsip inkompresibilitas aliran dan konservasi masa, momentum, energi dan medan magnet dikaji dengan pendekatan persamaan Navier-Stokes atau *material derivative*. Secara teori kompresibilitas aliran menjadi penting pada: 1) aliran dengan kecepatan sangat tinggi (lebih dari kecepatan suara), 2) ada perubahan panas yang sangat signifikan (perubahan fasa). Aliran fluida biasanya diperlakukan sebagai aliran *incompressible*, termasuk udara yang mengalir dengan kecepatan kurang dari kecepatan suara. Perubahan densitas pada udara karena variasi temperatur menyebabkan gaya apung (*buoyancy*). Variasi densitas bukan aliran terinduksi dan *incompressible* tidak berarti sama dengan keseragaman densitas.

Incompressibility berimplikasi bahwa densitas adalah konstan sepanjang garis aliran (*streamline*):

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (4.52)$$

namun bisa bervariasi antar *streamline* misalkan karena perbedaan temperatur. Dengan demikian berlaku prinsip konservasi masa. Densitas yang konstan, dapat dikonversi menjadi konservasi volume.

$$\sum_{\text{permukaan}}(\text{fluks volume}) = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.53)$$

Hal prinsip dalam *continuos fluid dynamic* (CFD) *incompressible* adalah 1) inkompresibilitas (konservasi volume), 2) persamaan momentum dalam konsistensi masa (konservasi momentum, p).

4.4.1. Penurunan Persamaan Advectif atau material

Persamaan untuk menggambarkan perubahan sifat zat, dapat dinyatakan dalam dua persamaan turunan yang umum. Pertama turunan yang dihubungkan dengan posisi yang tetap dalam ruang sebagai referensi (*volume control*), pernyataan ini dikenal dengan *derivative Eulerian*. Kedua, turunan yang mengikuti pergerakan *parcel* (volume kontrol), dinyatakan dalam turunan fungsi advectif atau material, yang dikenal dengan *derivative Lagrangian*.

Kedua pendekatan tersebut, pada dasarnya baik perubahan posisi partikel atau kontrol volume dalam fluida atau materi dalam ruang dapat dinyatakan dengan kecepatan gerak:

$$\frac{dS}{dt}(x, y, z) = \vec{V}(x, y, z, t) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k} \quad (4.54)$$

Atau dalam notasi lain:

$$\frac{dS}{dt}(x, y, z) = \frac{dS_x}{dt} + \frac{dS_y}{dt} + \frac{dS_z}{dt} = \frac{dx}{dt} + \frac{dy}{dt} + \frac{dz}{dt} = u + v + w$$

Sedangkan suatu percepatan gerak material (a = asselerasi) dinyatakan dalam perubahan kecepatan dalam fungsi waktu:

$$\vec{a}(x, y, z, t) = \frac{D\vec{V}(x,y,z,t)}{Dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{V} + \vec{u} \nabla \vec{V}$$

Secara umum \vec{V} dapat digantikan oleh parameter-parameter lain yang dapat berubah karena perubahan posisi atau karena waktu. Dengan demikian maka persamaan terakhir dapat ditulis dalam bentuk umum menjadi

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} C + u \nabla C \quad (4.55)$$

Pada sisi kiri ($\frac{DC}{Dt}$), derivative adalah sebuah derivative total, dimana C hanya merupakan fungsi waktu. Penyelesaian derivative total ini disebut formulasi Lagrangian. Sedangkan sisi kanan ($\frac{\partial C}{\partial t} + u \nabla C$), derivative adalah derivative parsial, dimana C merupakan fungsi waktu dan posisi. Pengamatan pada posisi yang berbeda akan mendapatkan C yang berbeda. Penyelesaian derivative parsial ini disebut formulasi Eulerian (LaCasce, 2013). Pada persamaan ini penulisan umum dan penjumlahan vektor berlaku:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \nabla; \nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}; u = u + v + w \quad (4.56)$$

Persamaan ini merupakan persamaan umum material derivatif Navier-Stokes. Secara prinsip perubahan total sifat intrinsik (baik vektor maupun scalar) zat dalam perubahan waktu dinyatakan dalam perubahan sifat tersebut dalam kurun waktu tertentu dan perubahan sifat karena perubahan posisi (x,y,z) karena kecepatan gerak (u) vektor zat tersebut melewati titik referensi (volume kontrol).

4.4.2. Penerapan Persamaan Navier-Stokes Untuk Menggambarkan Pola Aliran Atmosfer

4.4.2.1. Konservasi Massa (Keseimbangan Massa dalam Aliran Fluida)

Pada volume kontrol yang tetap, maka perubahan masa sebanding dengan perubahan densitas, jika volume kontrol diambil 1 satuan volume ($V = 1$) maka,

$$m = \rho V \sim \rho; \quad (4.57)$$

Menggunakan parameter masa ini pada persamaan umum derivatif, maka diperoleh:

$$\frac{Dm}{Dt} \sim \frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + u\nabla\rho$$

Secara umum jika masa konservatif, maka perubahan masa dalam fungsi waktu dan perubahan masa karena perubahan posisi dalam kecepatan tertentu adalah nol. Maka persamaan konservasi masa ini dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 &\Rightarrow \frac{\partial\rho}{\partial t} + u\nabla\rho + \rho\nabla u = 0 \\ \frac{D\rho}{Dt} + \rho\nabla u = 0; \quad \frac{D\rho}{Dt} = -\rho\nabla u &\quad (4.58) \end{aligned}$$

Jika fluida dalam perubahan posisinya dinyatakan *incompressible*, maka perubahan densitas total dalam fungsi waktu juga adalah nol, sehingga:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0; \quad \rho\nabla u = 0 \quad (4.59)$$

Persamaan ini menghasilkan kontinuitas aliran fluida, pada densitas tertentu maka total perubahan kecepatan adalah nol, dan dituliskan dari persamaan total dan dalam 2-D (pada bidang x - y) menjadi:

$$\nabla u = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial y}{\partial x} \quad (4.60)$$

Persamaan 4.60 ini merupakan persamaan dasar yang menyatakan persamaan gerak fluida dalam koordinat x - y (2D) atau menggunakan persamaan 4.53 jika perubahan juga terjadi pada sumbu z (3D). Untuk fluida alamiah seperti atmosfer dalam keseimbangan normal, maka perubahan kecepatan angin diasumsikan hanya terjadi pada bidang (x - y) saja dalam satu *stream* (aliran pada z tertentu). Dengan demikian perubahan kecepatan hanya digambarkan dalam 2D (bidang x - y).

4.4.2.2. Konservasi Momentum

Momentum merupakan kuantitas yang dihasilkan masa pada kecepatan tertentu; dalam volume kontrol yang konstan momentum juga dapat dinyatakan dalam persamaan densitas, sehingga:

$$\rho \sim m; \Rightarrow p = mu \sim \rho u$$

Menggunakan sifat intrinsik momentum dalam volume kontrol, disubstitusikan ke persamaan *material derivative* (4.56) dengan tanpa *sources* atau *sinks*, maka diperoleh:

$$\frac{D(\rho \cdot u)}{Dt} = \frac{d}{dt}(\rho \cdot u) + u \nabla \cdot (\rho \cdot u) \quad (4.61)$$

Persamaan 4.61 ini merupakan perubahan momentum partikel melalui fluida yang kontinyu. Persamaan di atas, dengan memasukkan kesetimbangan momentum dalam aliran (konservatif) dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{D(\rho u)}{Dt} = 0 = \rho \frac{Du}{Dt} + u \frac{D\rho}{Dt}$$

Substitusi sifat fluida *incompressible* (persamaan 4.59) pada persamaan di atas diperoleh:

$$\rho \frac{Du}{Dt} + u \frac{D\rho}{Dt} = \rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = 0 \quad (4.62)$$

Persamaan terakhir ini merupakan pernyataan hukum Newton ke dua tentang gaya karena percepatan benda ($F = m \cdot a = m \, dv/dt$). Dengan demikian dalam ketetapan keadaan setimbang, resultan gaya yang bekerja pada volume kontrol adalah nol dari segala arah. Pernyataan ini dapat dituliskan:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = \sum F = 0 \quad (4.63)$$

Penerapan persamaan 4.63 ini pada sistem *parcel* udara, maka semua gaya yang bekerja pada volume kontrol yang setimbang mempunyai resultan nol. Gaya-gaya tersebut yang bekerja pada volume kontrol adalah gaya *body* dan gaya permukaan. Kedua gaya tersebut adalah:

1. Gaya *body* terdiri atas gaya gravitasi (g), gaya elektromagnetik (B), gaya centrifugal (C_f), dan gaya coriolis (C)

$$F_b = F_g + F_B + F_{C_f} + F_C$$

$$F_g = \rho g;$$

Pada wilayah yang sempit, dan asumsi koordinat mengikuti kartesius (planar), maka gaya coriolis dapat diabaikan (dianggap seragam dan kecil).

Dengan gaya yang bekerja pada volume kontrol (gaya *body*) yang mempengaruhi alirannya dalam fluida adalah gaya gravitasi adalah:

$$\sum F_b = \sum F_g + \sum F_B$$

2. Sedangkan gaya permukaan (F_s) adalah gaya viskositas (τ) dan gaya tekanan internal zat (P). Kedua gaya ini disebut tekanan tensor (*tensor stress*, σ_{ij}). Gaya permukaan yang lain adalah gaya yang diakibatkan perubahan tekanan eksternal (F_p)

$$\sum F_\tau = \nabla \sigma_x + \nabla \sigma_y + \nabla \sigma_z = \nabla \sigma; \quad \sum F_p = -\nabla P$$

$$\sum F_s = \sum F_\tau + \sum F_p$$

Dengan demikian total dari kedua gaya tersebut adalah

$$\sum F = \sum F_b + \sum F_s$$

Memasukkan persamaan ini pada persamaan 11 dihasilkan:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = \sum F_b + \sum F_s$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g + F_B + \nabla \sigma - \nabla P \quad (4.64)$$

Persamaan ini merupakan persamaan hukum Newton kedua untuk fluida yang incompressible dan tidak ada perubahan massa dalam sistem volume kontrol.

Pada kasus khusus jika medan magnet diabaikan dan gaya eksternal dianggap nol. Maka persamaan hukum Newton kedua ini dapat dimodifikasi (pada arah sumbu x) menjadi:

$$\sum F_x = \sum F_{b-x} + \sum F_{s-x} = \rho(dx dy dz) g_x + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz$$

$$\sum F_x = \left(\rho g_x + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \right) dx dy dz$$

Total gaya/volume kontrol ($dx dy dz$) pada arah sumbu-x adalah, maka

$$\sum F_{xv} = \rho g_x + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{d}{dt}(u) + \frac{du}{dx} U + \frac{du}{dy} V + \frac{du}{dz} W \right)$$

$$= \rho g_x + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \quad (4.65)$$

Dengan cara yang sama persamaan untuk arah sumbu-y dan sumbu-z adalah:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left(\frac{d}{dt}(v) + \frac{dv}{dx} U + \frac{dv}{dy} V + \frac{dv}{dz} W \right)$$

$$= \rho g_y + \left(\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \right) \quad (4.66)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho \left(\frac{d}{dt}(w) + \frac{dw}{dx}U + \frac{dw}{dy}V + \frac{dw}{dz}W \right) \\ &= \rho g_z + \left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4.67)$$

Ketiga persamaan ini disebut **Persamaan Cauchy**

4.4.2.3. Konservasi Medan Magnet

Bumi merupakan bola medan magnet yang cukup kuat, sehingga pergerakan fluida di permukaannya juga akan diinduksi oleh medan magnet bumi tersebut. Jika medan magnet bumi dinyatakan dengan B , maka konservasi medan magnet ini dinyatakan dengan hukum Lorentz menjadi:

$$F_B = F_{Lz} = q[Ec + (\bar{u}B)] \quad (4.68)$$

Hukum Lorentz menyatakan gaya yang bekerja pada partikel bermuatan ketika melewati medan magnet. Gaya tersebut merupakan kombinasi gaya listrik dan magnet pada suatu titik bermuatan karena medan elektromagnetik. Jika medan listrik dianggap kecil $Ec \rightarrow 0$, maka total gaya Lorentz pada partikel yang bergerak melewati medan magnet B adalah:

$$F_B = quB \quad (4.69)$$

Medan magnet juga dapat dinyatakan dalam potensi vektor magnetik (A) dalam diferensial *curl* (lingkaran), yaitu:

$$B = \nabla \times A$$

Sehingga

$$F_B = q(\bar{u}B) = q(\bar{u}(\nabla \times A)); F_B = q(\nabla(uA) - u\nabla A) = qA\nabla u$$

Pada volume kontrol tetap:

$$q \sim m \sim \rho; F_B = A\rho\nabla u$$

Substitusi pada persamaan 4.58 diperoleh:

$$F_B = A \left(-\frac{D\rho}{Dt} \right) = -A \frac{D\rho}{Dt} \quad (4.70)$$

Menggunakan prinsip kontinuitas Navier-Stokes, maka persamaan kontinuitas untuk potensial magnetik dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + u\nabla A$$

Parameter Magnetik

$$M = \frac{\sigma B_0^2 a}{\rho u_\infty}$$

Menggunakan persamaan 4.64 dengan substitusi persamaan 4.70, diperoleh:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g - A \frac{D\rho}{Dt} + \nabla\sigma - \nabla P \quad (4.71)$$

4.4.2.4. Konservasi Energi

Hukum I termodinamika menyatakan konservasi energi atau kesetimbangan termal, dimana internal energi sebanding dengan panas (Q) yang diterima sistem dikurangi usaha/kerja sistem, atau:

$$E = Q - W; \quad W = PV$$

Maka,

$$\frac{DE}{Dt} = \frac{DQ}{Dt} - \frac{D(PV)}{Dt} = Q - P \frac{DV}{Dt} - V \frac{DP}{Dt} \quad (4.72)$$

Dalam volume kontrol berlaku $V = 1/\rho$, specific volume, $dV/dt = 0$. Jika perubahan energi karena adveksi dianggap tidak ada ($u\nabla E = 0$), maka:

$$\begin{aligned} \frac{DE}{Dt} &= Q - P \frac{DV}{Dt} \\ \frac{\partial E}{\partial t} + u\nabla E &= Q - P \left(\frac{\partial V}{\partial t} + u\nabla V \right); \quad dV = dx dy dz = \frac{1}{\rho} \\ \frac{\partial E}{\partial t} + 0 &= Q - P(dx dy dz) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) = Q - P \frac{1}{\rho} \nabla u \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} + P \nabla u &= \rho Q \end{aligned} \quad (4.73)$$

Pada gas ideal

$$\begin{aligned} P &= \rho RT; \quad \ln P = \ln \rho + \ln T; \quad E = c_v T \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} &= \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.74)$$

Menerapkan prinsip konservasi massa

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla u; \quad \nabla u = -\frac{(D\rho)/\rho}{Dt} = -\frac{\partial(\ln \rho)}{\partial t}$$

pada persamaan 4.74, diperoleh

$$P(\nabla u) = -P \frac{\partial(\ln \rho)}{\partial t} = \rho R \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4.75)$$

Substitusi persamaan 4.74 dan persamaan 4.75 ke persamaan 4.73 diperoleh persamaan hubungan temperatur-tekanan dan kalor yaitu:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho R \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} = \rho Q$$

$$\rho(c_v + R) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} = \rho Q \quad (4.76)$$

Hukum Fourier menyatakan hubungan temperatur, kalor dan konduktivitas termal dengan untuk k = konstanta *thermal conductivity* berlaku:

$$\rho Q = k \nabla^2 T \quad (4.77)$$

Sehingga,

$$\rho(c_v + R) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (4.78)$$

Implementasi lain dari hukum I Termodinamika adalah tentang perubahan densitas karena pengaruh temperatur dan tekanan dengan *thermal expansion constant* (β). Penurunan persamaan keadaan termodinamika

$$\rho = \rho(P, T); \quad E = E(P, T); \quad P = \rho RT \Rightarrow \rho = \frac{P}{RT};$$

Menghasilkan hubungan deferensial yang dapat dituliskan dalam dua bentuk persamaan matematis sebagai berikut:

$$d\rho = \frac{dP}{RT}; \quad \frac{d\rho}{dP} = \frac{1}{RT} \quad \text{atau} \quad d\rho = \frac{P}{R \cdot dT}$$

dan

$$\rho = \rho(P, T); \quad d\rho = \rho \alpha \cdot dP - \rho \beta \cdot dT$$

Konstantan pada persamaan terakhir merupakan koefisien ekspansi termal pada T tetap atau pada P tetap,

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \left[\frac{d\rho}{dP} \right]_T = \frac{1}{P}; \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{d\rho}{dT} \right]_P = \frac{1}{T} \quad (4.79)$$

Sehingga

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = \frac{dP}{P_0} - \frac{dT}{T_0} \quad (4.80)$$

Membagi persamaan tersebut dengan perubahan waktu pada kondisi T,P diperoleh:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.81)$$

Pada penurunan prinsip hidrostatis (persamaan 4.28) di atmosfer diperoleh hubungan tekanan dengan perubahan elevasi *parcel*, dimana

$$P = P_0 + \rho_0 g z \Rightarrow P - P_0 = dP = \rho_0 g z$$

Mensubstitusi persamaan hidrostatis tersebut ke persamaan 4.81, didapatkan hubungan densitas, tekanan, dan temperatur karena perubahan elevasi *parcel* udara,

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_0 g z}{P_0} - \frac{dT}{T_0}$$

Menggabungkan persamaan 4.79 dengan persamaan 4.78 diperoleh

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{P}{T} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{P}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (4.82)$$

Menggunakan asumsi aliran *incompressible*, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, maka persamaan 4.82 ini disederhanakan menjadi

$$\begin{aligned} \left(\rho C_p - \frac{P}{T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} &= k \nabla^2 T \\ \frac{P}{T} &= \rho R; \Rightarrow (C_p - R) \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \\ \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} &= k \nabla^2 T \end{aligned} \quad (4.83)$$

Perubahan temperatur (DT) merupakan persamaan adveksi-difusi, pada kecepatan alir = u, sehingga secara total persamaan 4.83 merupakan perubahan densitas (karena ekspansi atau kompresi) yang berhubungan dengan kalor sistem,

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T = \kappa \nabla^2 T = -Q \quad (4.84)$$

Dimana, $\kappa = \text{thermal diffusivity constant}$

4.4.3. Pendekatan Analisis untuk Penyelesaian Persamaan yang Dihasilkan Sebelumnya

Dari penerapan *material derivative* untuk 4 macam kesetimbangan atau konservasi di atas, diperoleh beberapa persamaan-persamaan utama yaitu:

1. Konservasi massa, *incompressibility*, dan kontinuitas

Konservasi Massa

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla u = 0;$$

Incompressibility

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0; \quad \rho \nabla u = 0$$

Kontinuitas

$$\nabla u = 0$$

2. Konservasi Momentum dan kesetimbangan gaya

Hukum Newton kedua,

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = \sum F = 0$$

Kesetimbangan Gaya

$$\Sigma F = \Sigma F_b + \Sigma F_s = 0$$

Persamaan Total

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g + F_B + \nabla \sigma - \nabla P$$

3. Konservasi Gaya Magnet (gaya Lorentz) dan konservasi massa

Gaya Lorentz,

$$F_B = A\rho \nabla u$$

Gaya Lorentz – Konservasi Massa

$$F_B = A \left(-\frac{D\rho}{Dt} \right) = -A \frac{D\rho}{Dt}$$

4. Konservasi Energi (Hk-1 Termodinamika dan Gas Ideal)

Hk-I Termodinamika

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + P \nabla u = \rho Q$$

Gas Ideal

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t}; \quad \frac{d\rho}{\rho_0} = \frac{dP}{P_0} - \frac{dT}{T_0}$$

Hk-I Termodinamika – Gas Ideal

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T$$

Menggabungkan konservasi massa, momentum, dan gaya magnet (prinsip penerapan hukum Newton kedua) diperoleh:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g - A \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \sigma - \nabla P$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g + A\rho \nabla u + \mu \nabla^2 u - \nabla P$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = \rho g + A\rho_0 \nabla u + \mu \nabla^2 u - \nabla P \quad (4.85)$$

Pada fenomena *bouyancy* (pengapungan) perubahan densitas *parcel* udara disebabkan oleh perubahan suhu dinyatakan dalam persamaan:

$$\rho g = (\rho_0 + \Delta\rho)g, \quad \Delta\rho = \rho - \rho_0 = -\rho_0 \frac{(T-T_0)}{T_0} = -\rho_0 \frac{dT}{T_0} + d\rho$$

$$\rho g = \left(\rho_0 - \rho_0 \frac{(T-T_0)}{T_0} \right) g \quad (4.86)$$

Substitusi persamaan 4.86 ke persamaan 4.85 menghasilkan:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = \left(\rho_0 - \rho_0 \frac{(T-T_0)}{T_0} \right) g + A\rho_0 \nabla u + \mu_0 \nabla^2 u - \nabla P$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = \left(1 - \beta(T - T_0) \right) g + A \nabla u + \frac{\mu_0}{\rho_0} \nabla^2 u - \frac{\nabla P}{\rho_0}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\nabla u = (1 - \beta(T - T_0))g + uB + v\nabla^2 u - \frac{\nabla P}{\rho_0}; \quad v = \frac{\mu_0}{\rho_0} \quad (4.87)$$

Dimana ν = viskositas kinematik. Dalam keadaan steady, $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, dan tidak ada perubahan tekanan/isobar ($\nabla P = 0$) maka

$$u\nabla u = g - \beta g(T - T_0) + v\nabla^2 u + B$$

Penerapan persamaan ini pada 1D (sumbu-x); diperoleh:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + g - \beta(T - T_0)g + B$$

Menggunakan prinsip similaritas, penerapan persamaan ini pada perubahan material (konsentrasi (C)) dapat dinyatakan dengan menganalogkan viskositas kinematik (ν) dengan difusifitas (Dx):

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + g - \beta(T - T_0)g + B \quad (4.88)$$

Jika gravitasi terlalu kecil untuk gas (diabaikan), temperatur ambien dianggap seragam, dan medan magnet diabaikan, maka persamaan ini menjadi:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{D_x}{u} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4.89)$$

4.4.4. Pendekatan Boussinesq

Pendekatan Boussinesq untuk persamaan-persamaan yang diperoleh pada sub 4.4.3, digunakan beberapa parameter nondimensional antara lain $L = \text{characteristic length}$ dan $U = \text{characteristic velocity}$. Dengan demikian beberapa vektor koordinat, kecepatan angin, tekanan, waktu dikonversi menjadi:

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L}, \quad \nabla' = L\nabla, \quad \bar{u} = \frac{u}{U}, \quad \bar{P} = \frac{P}{\rho U^2}, \quad \bar{t} = t \frac{U}{L}$$

Persamaan 4.87 dapat dimodifikasi menjadi:

$$\frac{\partial(\bar{u}U)}{\partial \bar{t}} + (\bar{u}U)\nabla'(\bar{u}U) = (1 - \beta(T - T_0))g + (\bar{u}U)B + \nu\nabla'^2(\bar{u}U) - \frac{\nabla'(\bar{P}\rho U^2)}{\rho_0};$$

$$U \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + U^2 \bar{u} \nabla' \bar{u} = (1 - \beta(T - T_0))g + U\bar{u}B + U\nu\nabla'^2 \bar{u} - U^2 \nabla' \bar{P}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \nabla' \bar{u} = g - \beta g(T - T_0) + \bar{u}B + \frac{\nu}{Lu} \nabla'^2 \bar{u} - \nabla' \bar{P}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \nabla' \bar{u} = g - \beta g(T - T_0) + \bar{u}B + \frac{1}{Re} \nabla'^2 \bar{u} - \nabla' \bar{P}$$

Dimana $Re = \text{Reynold Number}$ menyatakan turbulensi dalam aliran; $Re = \frac{\rho_* \mu_*^{1/2} L_*}{\eta_*}$

Beberapa bilangan tidak berdimensi yang diperlukan (*Nondimensionless Numbers formulation*) antara lain:

1. Peclet Number (Pe) dan Prandtl Number (Pr);

$$Pe = \frac{\rho_* L_*}{\alpha \mu_*^{1/2}} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/C_p \rho} = \frac{C_p \mu}{k} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}; \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

Dimana,

ν = difusivitas momentum (viskositas knematik) (m²/s)

α = difusivitas termal (m²/s)

μ = viskositas dinamik (s/m²)

k = konduktivitas termal (W/mK)

C_p = panas spesifik (J/KgK)

ρ = densitas (kg/m³)

Nilai Prandtl yang kecil (Pr << 1) menyatakan perubahan sifat fluida yang didominasi oleh difusivitas termal. Sedangkan nilai Prandtl yang besar (Pr >> 1) menyatakan perubahan sifat fluida yang didominasi oleh difusivitas momentum. Nilai pendekatan beberapa angka Prandtl untuk beberapa material ditampilkan pada Tabel 4.17 berikut ini:

Tabel 4.17 Nilai *Prandtl Number* untuk beberapa material

Material	Nilai Pr	Temperatur (K)
Molten potassium	0.003	975
mercury	Sekitar 0.015	
Mixture noble gasses (or with hydrogen)	0.16 – 0.7	
Oxygen	0.63	
Air any other gasses	0.7 – 0.8	
Ammonia	1.38	
Refrigerant R-12	4 – 5	
Water	7	293,13
Sea water	13.4; 7.2	273.13; 293.13
n-butanol	50	
Engine oil	100 – 40000	
Glycerol	1000	
Polymer melts	10,000	
Earth's mantle	1 x 10 ²⁵	

2. Parameter konveksi (Widodo, Khalimah, Zainal, & Imron, 2016):

$$\alpha = \frac{Gr}{Re^2}$$

Merupakan perbandingan Grashof number (Gr) dengan bilangan Reynold. Persamaan ini menyatakan juga perbandingan *buoyancy* terhadap gaya viskositas (*Ratio of the buoyancy to viscous force acting*) pada fluida (*natural convection*)

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

ρ_* = densitas tipikal; L_* = panjang tipikal; μ_* = potensial kimia; η_* = viskositas tipikal and α = laju difusi termal; ν = laju difusi viskos.

4.4.5. Pendekatan Model Dispersi Pencemar di Atmosfer Permukaan

Perubahan konsentrasi kontaminan pada suatu volume kontrol tertentu dapat terjadi karena proses difusi, adveksi (fisika) dan proses lain yang terjadi (kimia atau biologi) atau *sinks material* (S_m). Pada dasarnya S_m merupakan akumulasi proses reaksi pembentukan dan pengurangan. Proses ini jika terjadi pada fluida tidak terkompresi (*incompressible*), dengan kecepatan alir fluida sebesar v dan besar *sinks* atau penyerapan oleh air, S_m , dapat dinyatakan dalam persamaan 4.55 dimodifikasi sebagai berikut:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v\nabla C = \nabla(D\nabla C) + S_m \quad (4.90)$$

Kasus paling sederhana dalam dispersi ini adalah distribusi zat konservatif dan asumsi tidak terjadi akumulasi kontaminan dalam volume kontrol, karena proses-proses lain, sehingga $S_m = 0$, maka untuk kondisi isotropik (laju difusi sama untuk semua arah x, y, dan z) persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v\nabla C = \nabla(D\nabla C) \quad (4.91)$$

Atau pada kondisi dianggap anisotropik, koefisien dispersi D_i tergantung pada arah perpindahan xi, maka persamaan dispersi diatas ditulis lengkap menjadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sum_1^i v_i \nabla C = \sum_1^i \nabla(D_i \nabla C)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan yang paling umum digunakan untuk menyatakan hubungan pencampuran kontaminan dalam sistem fluida. Persamaan tersebut lebih dikenal sebagai persamaan adveksi – dispersi atau adveksi – difusi. Jika persebaran kontaminan karena difusi saja, atau karena tidak ada perlambatan atau percepatan *transport* kontaminan dalam aliran media, maka dapat dianggap $v = 0$, sehingga:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_1^i \nabla(D_i \nabla C) = \sum_1^i D_i (\nabla^2 C)$$

Dalam bentuk koordinat Cartesian, pernyataan matematik ini dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_1^i \left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (4.92)$$

Secara matematis persamaan ini jika dihitung secara parsial (satu dimensi) untuk masing-masing arah vektor x, y, dan z maka asumsi perubahan pada sumbu lain harus konstan. Dengan demikian perhitungan vektor arah x dan dimensi waktu t, dilakukan dengan asumsi perubahan pada sumbu y dan pada sumbu z dianggap seragam sehingga,

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y_i^2} = 0 \text{ dan } \frac{\partial^2 C}{\partial z_i^2} = 0$$

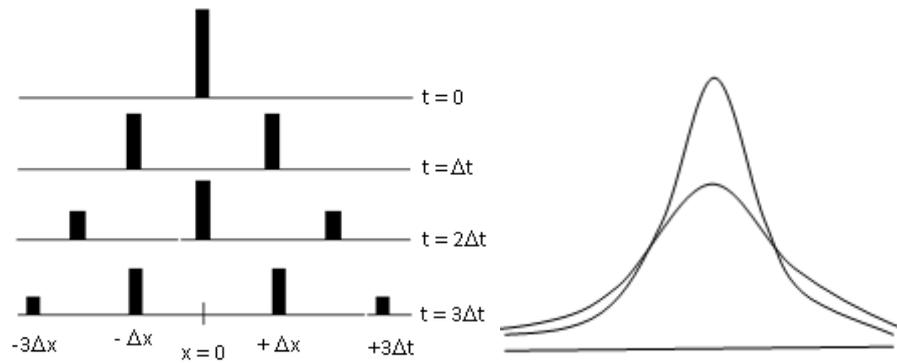
Sehingga persamaan kartesian untuk difusi – adveksi di atas, dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_1^i \left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (4.93)$$

Dengan cara yang sama, persamaan parsial $\frac{\partial C}{\partial t}$ dapat juga diturunkan untuk arah y,t dan z,t. Yaitu:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_1^i \left(D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right); \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_1^i \left(D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Dengan memberikan kondisi awal dan kondisi batas, persamaan deferensial parsial orde dua di atas secara analitik dapat diselesaikan dengan persamaan deret Fourier atau integral Fourier. Penyelesaian untuk kasus-kasus geometri dan kondisi batas sederhana diusulkan (Crank 1979). Secara prinsip, kontaminan akan terdistribusi normal dengan difusi atau konveksi sepanjang aliran, secara random. Pada kondisi awal kontaminan dilepaskan ke media ($x = 0$ dan $t = 0$), semua kontaminan diasumsikan memiliki posisi yang sama dengan konsentrasi terbesar. Ketika segmen waktu bertambah, Δt , partikel-partikel bergerak terbatas sebesar $-\Delta x$ atau $+\Delta x$, dengan probabilitas sama. Semakin lama, partikel-partikel semakin tersebar namun konsentrasi terbesar setiap saat tetap pada posisi awal kontaminan dilepaskan, seperti pada Gambar 4.34.



Gambar 4.34. Posisi dan konsentrasi partikel terbatas yang bergerak setiap tahap $+\Delta x$ per tahap waktu Δt .

Menggunakan inversi Fourier atau integrasi untuk menyelesaikan persamaan 4.93, untuk persamaan difusi 1D (Crank 1979) diperoleh:

$$C(x, t) = \frac{a}{\sqrt{t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_x t}\right) \quad (4.94)$$

Dengan a adalah konstanta acak yang dapat diperoleh dari penyelesaian persamaan total massa kontaminan per unit luas penampang (A), untuk $t \rightarrow \infty$,

$$\frac{m_a}{A} = \int_{-\infty}^{\infty} C dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a}{\sqrt{t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_x t}\right) dx = 2a\sqrt{\pi D_x t}$$

Kemudian dengan substitusi persamaan terakhir ke persamaan 4.94 akan diperoleh:

$$C(x, t) = \frac{m_a}{2A\sqrt{\pi D_x t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_x t}\right) \quad (4.95)$$

Persamaan ini berlaku dengan $x = 0$ dan $t = 0$ sebagai kondisi awal atau kondisi batas. Lebih umum konsentrasi kontaminan setiap saat pada setiap titik x dapat dirumuskan berdasarkan persamaan di atas dengan memasukkan perubahan posisi karena gerak kontaminan, menjadi:

$$C(x, t) = \frac{m_a}{2A\sqrt{\pi D_x t}} \exp\left(\frac{-(x-\Delta x)^2}{4D_x t}\right)$$

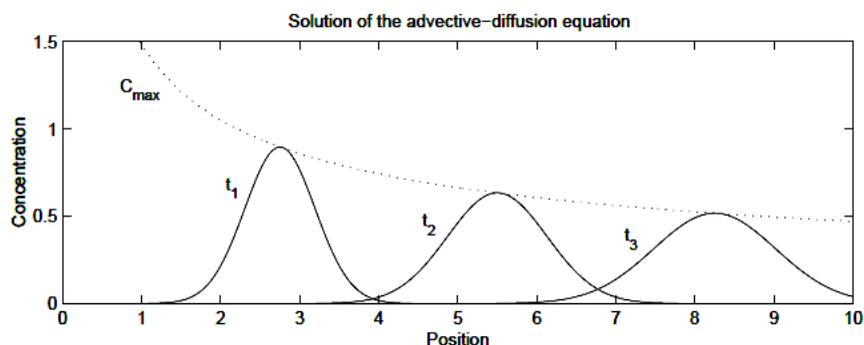
dengan $\Delta x = vt$, maka

$$C(x, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left(\frac{-(x-vt)^2}{4D_x t}\right) \quad (4.96)$$

Pada persamaan di atas, jika $v = 0$, maka perubahan konsentrasi pada x dan t tertentu, hanya disebabkan oleh difusi saja seperti persamaan 4.95.

Dalam suatu aliran fluida, kontaminan yang dilepaskan dari sumber dengan satu titik yang jelas (*point source*), akan bergerak mengikuti aliran (adveksi) dan menyebar ke arah x, y, z (difusi) secara linear, simultan, dan independen. Kondisi ini

dapat dijelaskan dengan prinsip superposisi. Pada satu volume kontrol yang konsisten, maka kontaminan akan bergerak mirip suatu awan yang mengalir (*downstream*) dan makin menyebar (terdispersi). Dalam satu dimensi profil pergerakan *plume* kontaminan dapat dilihat pada Gambar 4.35. Pada kondisi awal, konsentrasi sangat besar dan penyebarannya sangat kecil, bertambahnya t awan kontaminan semakin jauh dari titik awal (konveksi) dan menyebar lebih lebar (difusi). Pengamatan lapangan menunjukkan, bertambahnya waktu membawa awan kontaminan menempati daerah sebaran yang semakin luas dan konsentrasi puncak yang semakin kecil.



Gambar 4.35 Skema adveksi-difusi dalam satu dimensi. Garis putus-putus menunjukkan konsentrasi maksimum aliran *plume* kontaminan sebagai fungsi waktu dan jarak.

4.4.5.1. Distribusi konsentrasi spasial awal (di sumber)

Kontaminan dapat terdistribusi satu dimensi pada sistem fluida dengan data awal tertentu (masa kontaminan (m), koordinat sumber (x), waktu (t)) dan hidrolis (konstanta distribusi (D) dan luas penampang (A)). Konsentrasi kontaminan pada posisi dan waktu tertentu dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan di atas. Pada saat awal emisi ($t \rightarrow 0$) pendekatan teorema limit menghasilkan:

$$C(x_n, 0) = \frac{m_a}{A} \delta(x - x_n)$$

Sedangkan pada kondisi x sangat jauh, pada waktu t ($x \rightarrow \infty$), konsentrasi kontaminan mendekati nol:

$$C(\infty, t) = 0$$

Pada penyelesaian satu dimensi, jika c_1 dan c_2 merupakan penyelesaian terpisah dari suatu persamaan difusi satu dimensi, dimana:

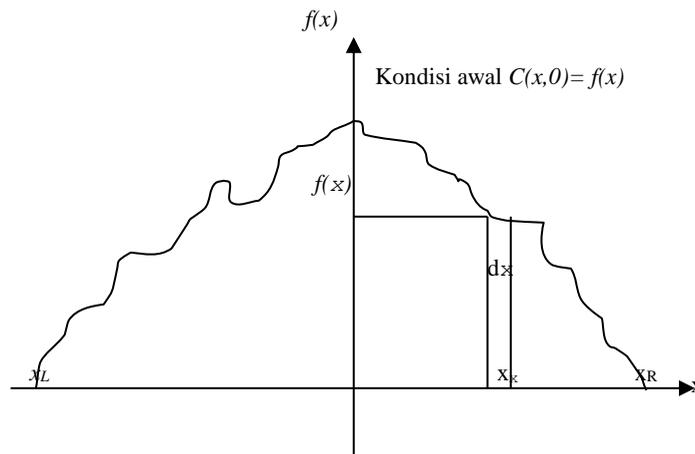
$$c_1(x, 0) = \frac{m_1}{A} \delta(x - x_1), \text{ dan } c_2(x, 0) = \frac{m_2}{A} \delta(x - x_2),$$

Kondisi awal dasar dari $c_1 + c_2$ dapat dituliskan

$$C(x, 0) = (c_1 + c_2)(x, 0) = \frac{m_1}{A} \delta(x - x_1) + \frac{m_2}{A} \delta(x - x_2)$$

Pada satu segmen $\Delta x \rightarrow \xi \rightarrow 0$ maka persamaan ini dapat dituliskan menjadi

$$C(\xi, t) = \frac{m_1+m_2}{A} \xi = f(\xi) \delta \xi$$



Gambar 4.36 Distribusi konsentrasi kontaminasi

Jika konsentrasi pada kondisi awal $(x,0)$ adalah $f(x)$ seperti pada Gambar 4.36 maka jumlah massa pada satu segmen sekitar $\xi \rightarrow 0$ adalah

$$\frac{m_{a\xi}}{A} = f(\xi) d\xi$$

Dan jumlah massa di seluruh daerah di bawah kurva adalah penjumlahan seluruh $m_{a\xi}$ pada segmen-segmen yang dibuat dengan jarak $\xi \rightarrow 0$ sehingga

$$m_a = \sum_{\xi=x_L}^{x_R} m_{a\xi}$$

Selanjutnya profil distribusi pada sumber distribusi (awal kontaminasi) sesaat setelah pelepasan kontaminan dapat diprediksi menggunakan prinsip superposisi konsentrasi $(C(x,t))$ pada jarak ξ dari asal emisi:

$$C(\xi, t) = \frac{m_{a\xi}}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left(\frac{-(x-\xi)^2}{4D_x t}\right)$$

Dan konsentrasi rata-rata di semua titik di bawah kurva adalah penjumlahan dari semua massa kontaminan yang terdistribusi pada semua area di bawah kurva, sehingga diperoleh:

$$C(x, t) = \int_{\xi=x_L}^{x_R} \frac{m_{a\xi}}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left(\frac{-(x-\xi)^2}{4D_x t}\right)$$

Dengan substitusi persamaan $\frac{m_{a\xi}}{A} = f(\xi)d\xi$ maka ringkasan rumus yang digunakan untuk memprediksi konsentrasi rata-rata kontaminan di semua titik sekitar sumber adalah:

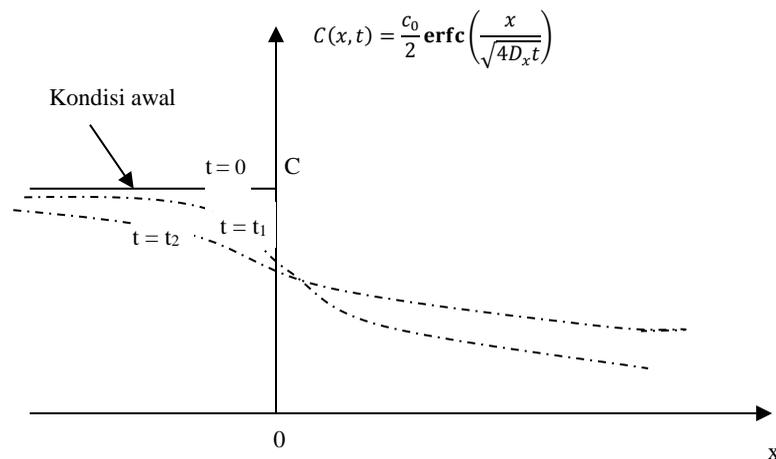
$$C(x, t) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{f(\xi)d\xi}{\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{4D_x t}\right]$$

Asumsi sumber diskontinyu, maka konsentrasi pada sistem fluida akan menurun sebagai fungsi waktu dan fungsi jarak dari titik awal emisi. Semakin lama (t makin besar) konsentrasi secara normal akan menurun, demikian juga jarak makin jauh dari titik awal (x semakin besar), seperti terlihat pada Gambar 4.37. Keduanya disebabkan oleh proses difusi. Distribusi konsentrasi sebagai fungsi waktu dan jarak merupakan penyelesaian dari persamaan di atas:

$$C(x, t) = \frac{c_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt}{\sqrt{4D_x t}}\right) = \frac{c_0}{2} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x-vt}{\sqrt{4D_x t}}\right)\right) \quad (4.97)$$

Jika kontaminan masuk ke sistem fluida secara merata di semua titik, dengan konsentrasi yang relatif tetap, saat awal terjadi penurunan yang cepat (dalam dimensi spasial dan waktu). Dan jika suplai kontaminan terus menerus dan terjadi sepanjang aliran, maka dengan asumsi kontaminan konservatif, maka konsentrasi kontaminan akan kembali naik sampai batas jenuhnya. Distribusi semacam ini, dapat dirumuskan dengan modifikasi persamaan sebelumnya, menjadi:

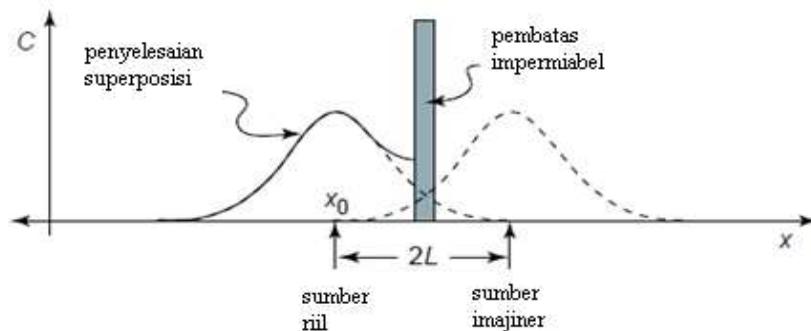
$$C(x, t) = c_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt}{\sqrt{4D_x t}}\right) = c_0 \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x-vt}{\sqrt{4D_x t}}\right)\right) \quad (4.98)$$



Gambar 4.37 Difusi setelah satu tahap-fungsi dari kondisi awal

4.4.5.2. Distribusi dari sumber transient, dan pembatas dengan tidak ada fluks padanya

Kontaminan yang dilepaskan pada fluida yang hampir tidak mengalir, maka kontaminan tersebut akan segera terdispersi secara normal. Jika satu sisi ada pembatas yang tidak permeabel terhadap kontaminan, maka dispersi kontaminan yang mencapai pembatas (*boundary*) akan dipantulkan kembali ke sistem fluida, sehingga konsentrasi di sekitar pembatas akan lebih besar dari dispersi normalnya. Perubahan konsentrasi di sekitar pembatas ini dapat diprediksi dengan seolah-olah menggambarkan pencerminan distribusi kontaminan. Konsentrasi sebenarnya adalah penjumlahan dari distribusi normal dan pencerminan imajiner (Gambar 4.38).



Gambar 4.38 Skema pembatas tanpa fluks, distribusi normal dan pencerminan distribusi imajiner (garis putus-putus) dan penyelesaian superposisi (garis tidak putus-putus) merupakan jumlah dari massa distribusi dan imajiner pada posisi yang sama

Jika kontribusi dari sumber real adalah $C(x_0, t)$ dan kontribusi dari sumber imajiner adalah $C(2L, t)$ maka, konsentrasi di setiap titik pada kondisi di atas adalah:

$$C(x, t) = C(x_0, t) + C(2L, t)$$

$$C(x, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4D_x t}\right) + \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left(\frac{-(x-2L)^2}{4D_x t}\right)$$

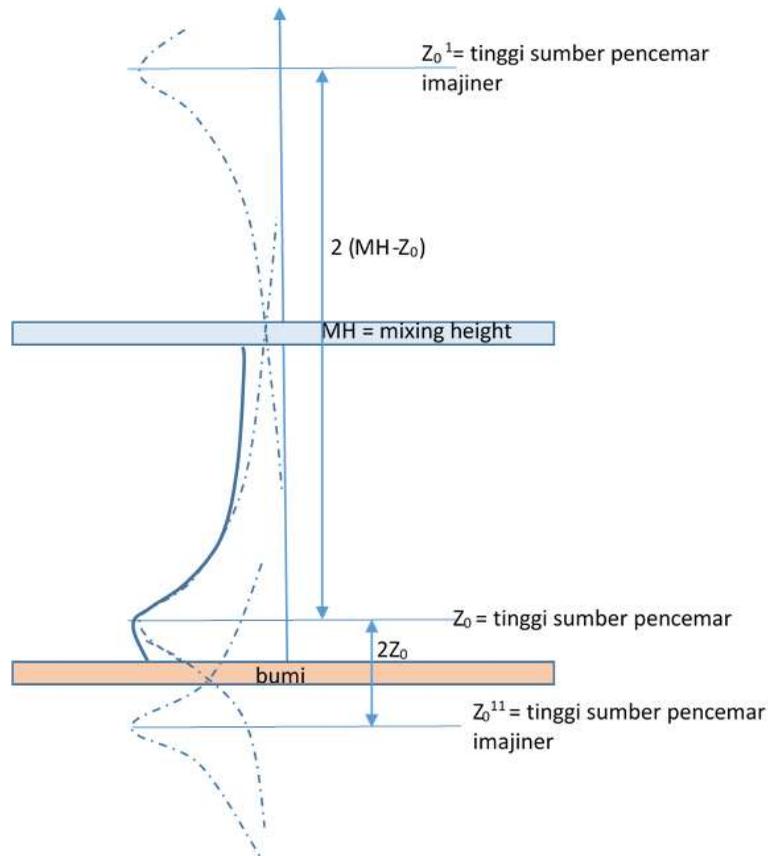
$$C(x, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \left(\exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4D_x t}\right) + \exp\left(\frac{-(x-2L)^2}{4D_x t}\right) \right) \quad (4.99)$$

Ketika ditentukan titik emisi sebagai awal koordinat, dimana $x_0 = 0$, maka persamaan menjadi:

$$C(x, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_x t}} \left(\exp\left(\frac{-x^2}{4D_x t}\right) + \exp\left(\frac{-(x-2L)^2}{4D_x t}\right) \right) \quad (4.100)$$

4.4.5.3. Pendekatan model dispersi pada kontaminan di atmosfer

Pendekatan paling sederhana dalam model sitribusi pencemar di atmosfer adalah dengan membangun beberapa asumsi bahwa pencemar setelah dilepaskan di atmosfer akan mengalami difusi dan adveksi secara linear. Difusi akan terjadi sampai batas (*boundary*) tercapai oleh *parcel* atau *plume* pencemar. Secara skematis, modifikasi Gambar 4.38 untuk difusi vertikal (searah z) dengan ketinggian sumber z_0 dapat dilihat pada Gambar 4.39 berikut ini.



Gambar 4.39 Skema pembatas tanpa fluks, distribusi normal dan pencerminan distribusi imajiner (garis putus-putus) di atmosfer

Pada *altitude* di atas sumber pencemar ($z > z_0$); maka konsentrasi di setiap titik sepanjang sumbu z dengan y dan x tetap, merupakan jumlah superposisi distribusi konsentrasi dari sumber riil dan sumber imajiner dengan batas lapisan *mixing height*. Sehingga:

$$C(z, t) = C(z_0, t) + C(2(MH - z_0), t)$$

$$C(z, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_z t}} \exp\left(\frac{-(z-z_0)^2}{4D_z t}\right) + \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_z t}} \exp\left(\frac{-(z-2(MH-z_0))^2}{4D_z t}\right)$$

$$C(z, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_z t}} \left(\exp\left(\frac{-(z-z_0)^2}{4D_z t}\right) + \exp\left(\frac{-(z-2(MH-z_0))^2}{4D_z t}\right) \right) \quad (4.101)$$

Jika sumber pencemar dianggap cukup rendah ($z_0 \ll MH$) sehingga dapat ditentukan titik sumber sebagai awal koordinat, dimana $z_0 = 0$, maka persamaan dispersi konsentrasi di atas sumber emisi menjadi:

$$C(z, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_z t}} \left(\exp\left(\frac{-z^2}{4D_z t}\right) + \exp\left(\frac{-(z-2(MH))^2}{4D_z t}\right) \right) \quad (4.102)$$

Pada altitude di bawah sumber pencemar ($z < z_0$), konsentrasi di setiap titik sepanjang sumbu z dengan y dan x tetap, merupakan jumlah superposisi distribusi konsentrasi dari sumber riil dan sumber imajiner dengan batas permukaan bumi. Sehingga:

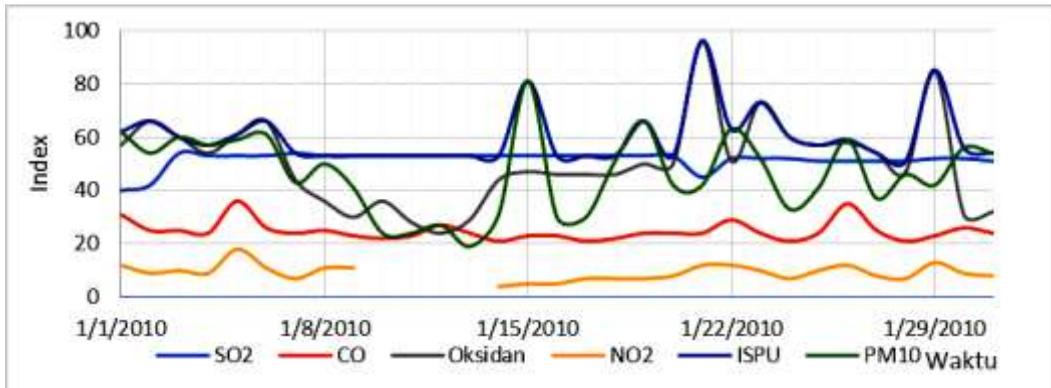
$$\begin{aligned} C(z, t) &= C(z_0, t) + C(-z_0, t) \\ C(z, t) &= \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_z t}} \exp\left(\frac{-(z-z_0)^2}{4D_z t}\right) + \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_z t}} \exp\left(\frac{-(z+z_0)^2}{4D_z t}\right) \\ C(z, t) &= \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_z t}} \left(\exp\left(\frac{-(z-z_0)^2}{4D_z t}\right) + \exp\left(\frac{-(z+z_0)^2}{4D_z t}\right) \right) \end{aligned} \quad (4.103)$$

4.5. Pendekatan Kinetika zat non konservatif untuk Model yang dihasilkan pada Atmosfer Kota Surabaya

4.5.1. Profil Pencemaran dan nilai ISPU dalam rentang harian

Pendekatan kinetika reaksi zat pencemar non konservatif didasarkan pada data-data yang dikumpulkan dari stasiun ISPU Kota Surabaya. Dalam data tersebut penentuan nilai ISPU (Indek Standar Pencemaran Udara) ditentukan oleh parameter-parameter terukur yang nilai indeksnya paling besar. Sehingga nilai ISPU merupakan nilai kriteria dampak total dari semua parameter terhadap lingkungan. Contoh rangkuman nilai ISPU dan parameter-parameter yang mempengaruhinya dapat dilihat pada Gambar 4.40.

Pada gambar tersebut, berdasarkan data bulan Januari 2010, nampak tidak semua parameter menjadi penyebab nilai ISPU maksimum tiap harinya. Analisis lebih lanjut diperlukan untuk menentukan parameter-parameter penting yang mendominasi ISPU. Selanjutnya berkaitan dengan pendekatan kinetika, parameter penting yang bersifat non konservatif dilihat hubungannya dengan parameter lain.



Gambar 4.40. Profil Indeks Pencemar parameter ISPU dan nilai ISPU maksimum harian Januari 2010

Beberapa parameter pencemar yang dominan mempengaruhi nilai ISPU adalah SO_2 , oksidan (O_3), dan PM_{10} . Dari ketiga parameter ini:

1. SO_2 merupakan parameter pencemar yang hanya dipengaruhi oleh sumber pencemar dan dispersi di atmosfer.
2. PM_{10} merupakan parameter pencemar diskrit berupa material padat dengan pola dispersi berbeda dengan gas kontinyu, sehingga akan dikembangkan dalam riset berikutnya
3. Oksidan atau ozone permukaan merupakan parameter pencemar skunder yang dihasilkan dari reaksi fotokimia antara radikal O dari NO_2 yang diinisiasi oleh radiasi (GRAD).

Dengan demikian untuk menentukan inputan model dispersi, maka analisis kinetika reaksi pencemar di atmosfer dilakukan terhadap hubungan NO_2 , O_3 , dan GRAD. Ketiga parameter saling terkait dalam reaksi fotokimia yang terjadi di atmosfer. NO_2 dan O_3 merupakan pencemar yang non konservatif. Distribusi kedua pencemar ini dipengaruhi oleh difusi, adveksi, dan reaksi yang dijalaninya di atmosfer.

Sedangkan parameter SO_2 , dapat langsung dimodelkan dalam dispersi atmosfer karena secara analisis merupakan pencemar primer dan tidak mengalami reaksi fotokimia (tidak secara langsung dipengaruhi pencemar lain) di atmosfer. Pencemar SO_2 bersifat konservatif. Persamaan-persamaan yang dihasilkan di atas dapat digunakan untuk SO_2 tanpa harus menambahkan kinetika pencemar di atmosfer. Distribusi SO_2 lebih dominan karena adveksi dan difusi.

4.5.2. Kajian Kinetika Pencemar Udara di Perkotaan Dihubungkan dengan GRAD, Kasus Ozon Permukaan

Karakteristik ozon permukaan (O_3), dikaji berdasarkan hubungan perubahan konsentrasinya di atmosfer dengan perubahan radiasi permukaan terukur (GRAD) dan perubahan konsentrasi nitrogen dioksida ($[NO_2]$). Gas NO_2 ini merupakan prekursor dalam reaksi pembentukan ozon di atmosfer bawah, dalam reaksi fotokimia. Pendekatan yang digunakan adalah:

1. Penentuan pola yang menggambarkan perubahan $[O_3]$ dan $[NO_2]$ dihubungkan dengan perubahan intensitas radiasi dalam siklus harian dan siklus bulanan terbagi dalam musim kemarau dan musim penghujan.
2. Penentuan hubungan matematik parameter-parameter GRAD, $[O_3]$, dan $[NO_2]$ hasil analisis regresi terhadap data pengukuran terolah.
3. Penentuan konstanta dan orde reaksi pada kajian kinetika parameter-parameter tersebut, berdasarkan fotoreaksi yang mungkin terjadi.

Hasil dari pendekatan ini adalah persamaan kinetika atau matematika yang menggambarkan perubahan konsentrasi. Persamaan ini kemudian dimanfaatkan sebagai model perubahan ozon di atmosfer perkotaan. Beberapa asumsi perlu diberikan untuk menyederhanakan permasalahan analisis. Asumsi-asumsi tersebut antara lain:

1. reaksi fotokimia dianggap homogen
2. parameter pencemar lain atau zat lain di atmosfer tidak berpengaruh dalam fotoreaksi
3. tidak ada kontribusi ozon dari sumber pencemar primer
4. elevasi daerah studi dianggap sama sekitar 5 m dpl.

Semua analisis didasarkan pada data pengukuran BLH Surabaya dan rata-rata dengan kondisi yang relevan. Satuan-satuan yang digunakan dinyatakan dalam konsentrasi ozon ($[O_3]$) adalah $\mu g/m^3$, konsentrasi nitrogen oksida ($[NO_2]$) $\mu g/m^3$ dan GRAD adalah $watt/m^2$.

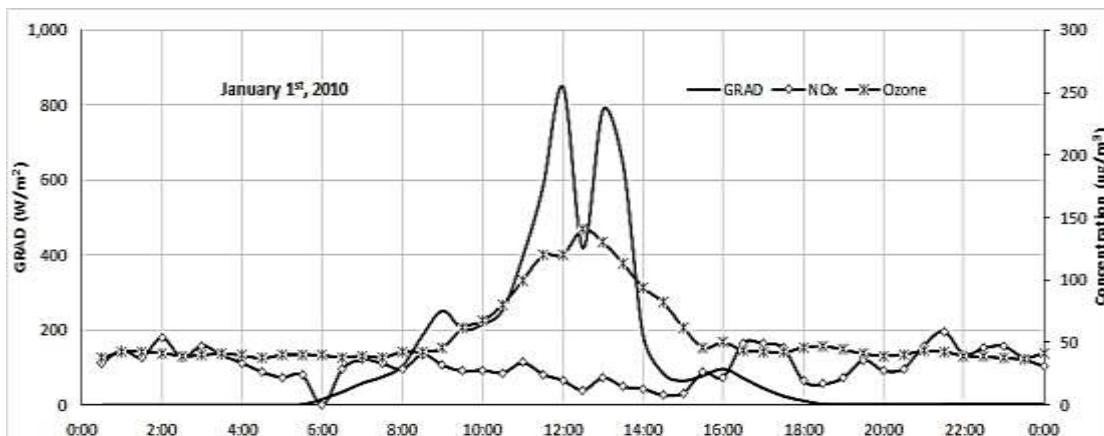
Memperhatikan sifat data dan hasil yang diperoleh pada sub bab 4.1, analisis di tahap ini juga menggunakan klasifikasi data musim kemarau dan data musim penghujan. Pada dua klasifikasi tersebut dipilih masing-masing 3 bulan data mewakili data semusim. Pemilihan ini didasarkan kelengkapan jumlah data yang tersedia pada 3 bulan berurutan. Berdasarkan hal tersebut, data-data yang mewakili

musim kemarau adalah data yang dikumpulkan pada bulan Juni, Juli, dan Agustus 2010. Sedangkan data-data yang mewakili musim penghujan adalah data bulan Januari, Februari, dan Maret 2010.

Untuk masing-masing klasifikasi kemudian digambarkan pola harian selama satu bulan dan nilai maksimum harian untuk analisis lebih lanjut, baik untuk musim kemarau dan musim penghujan. Perubahan $[O_3]$ - $[NO_2]$ dihubungkan dengan GRAD dikarakterisasi dari pola ini. Hubungan antar parameter ini dianalisis untuk menentukan hubungan matematik antar parameter dan nilai kinetika.

4.5.2.1. Profil perubahan konsentrasi ozon permukaan

Berdasarkan data analisis, konsentrasi ozon permukaan berubah menurut pola siklus harian. Pada waktu setelah matahari terbit (siang hari), konsentrasi ozon permukaan secara perlahan naik. Kenaikan ini disebabkan mulai berlangsungnya fotoreaksi kimia dengan kehadiran fluks radiasi matahari. Pola konsentrasi ozon permukaan yang terekam pada 1 Januari 2010 ditampilkan pada Gambar 4.39. Konsentrasi maksimum ozon permukaan di atmosfer terjadi sekitar tengah hari, berhubungan dengan fluks maksimum intensitas matahari. Selanjutnya konsentrasi ozon permukaan menurun sampai level minimum sekitar waktu tenggelamnya matahari. Level minimum terjadi sepanjang waktu malam hingga matahari kembali terbit waktu berikutnya. Pada Gambar 4.41 terlihat perubahan konsentrasi ozon yang terukur di Kota Surabaya nampak sebanding dengan perubahan intensitas radiasi (GRAD). Sedangkan NO_2 menunjukkan pola yang sebaliknya.



Gambar 4.41. Profil perubahan $[O_3]$, $[NO_2]$, dan GRAD pada musim kemarau (1 Januari 2010)

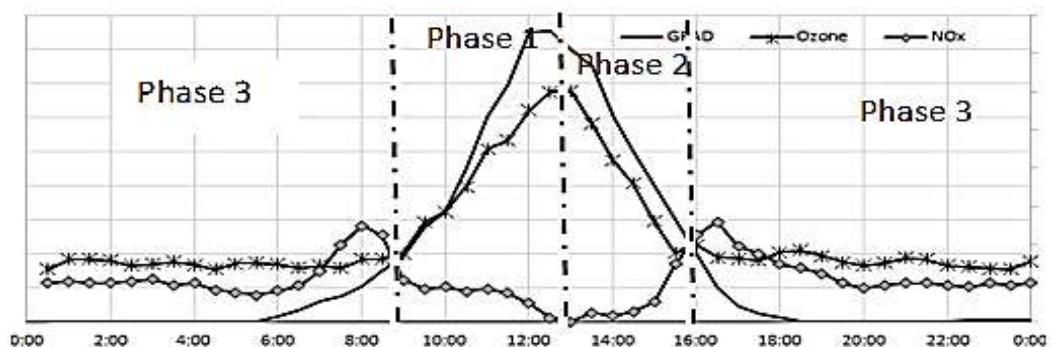
Dari Gambar 4.41 dapat dianalisis bahwa level konsentrasi ozon permukaan berubah dalam 3 fase siklus dominan, yaitu:

1. Fase 1, adalah fase peningkatan atau fase pembentukan sampai level maksimum
2. Fase 2, adalah fase penurunan atau fase destruksi sampai level minimum
3. Fase 3, adalah fase tunak (*steady*) pada level minimum atau level tidak ada perubahan.

Fase-fase ini lebih sederhana di ilustrasikan pada Gambar 4.42. Perubahan konsentrasi ozon permukaan nampak berhubungan kuat dengan kuat fluks radiasi matahari dan $[\text{NO}_2]$ sebagai prekursoranya.

Pada kasus Surabaya, berdasarkan rekapitulasi data teranalisis, fase siklus ozon harian dapat dinyatakan sebagai berikut:

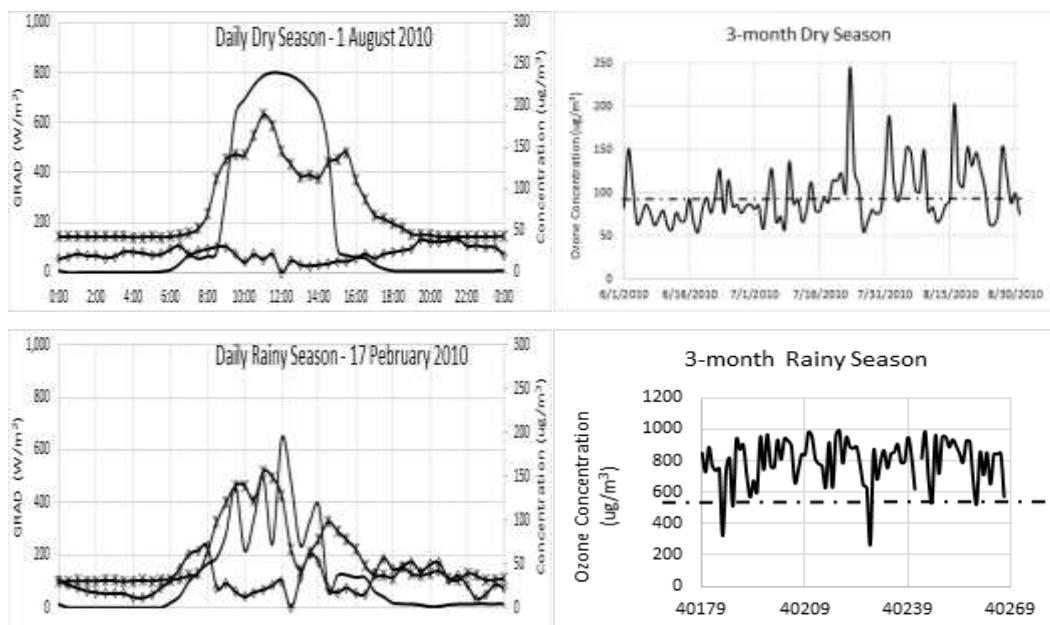
1. Fase 1 atau fase pembentukan ozon permukaan, dimulai sekitar pukul 08.30 WIB sampai sekitar tengah hari (12.310 atau 13.00 WIB). Pada fase ini konsentrasi ozon permukaan telah meningkat dari sekitar 30 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sampai nilai maksimum rata-rata sekitar 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada musim penghujan dan sekitar 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada musim kemarau.
2. Fase 2 atau fase destruksi ozon terjadi setelah tengah hari sampai kira-kira sore hari (16.00 atau 17.00 WIB). Dalam fase ini konsentrasi ozon menurun sampai minimum level yaitu 30 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
3. Fase 3 atau fase steady dalam level konsentrasi ozon minimum terjadi pada malam hari hingga matahari terbit hari berikutnya. Dalam fase ini konsentrasi ozon relatif konstan pada minimum level.



Gambar 4.42. Penyederhanaan deskripsi fase perubahan konsentrasi ozon dalam siklus harian

Nampak pada Gambar 4.41 dan Gambar 4.42 tidak ada akumulasi ozon yang mungkin terjadi pada area studi. Hal ini karena hampir semua pencemar segera terbawa angin ke area lain. Wilayah studi merupakan area dekat dengan laut dimana perubahan angin merupakan siklus harian, siang dan malam. Dalam analisis musiman, tingkat konsentrasi ozon nampak mengalami sedikit perbedaan dalam musim kemarau dan musim hujan. Konsentrasi maksimum rata-rata pada musim hujan sekitar $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan pada musim kemarau sekitar $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seperti pada Gambar 4.43.

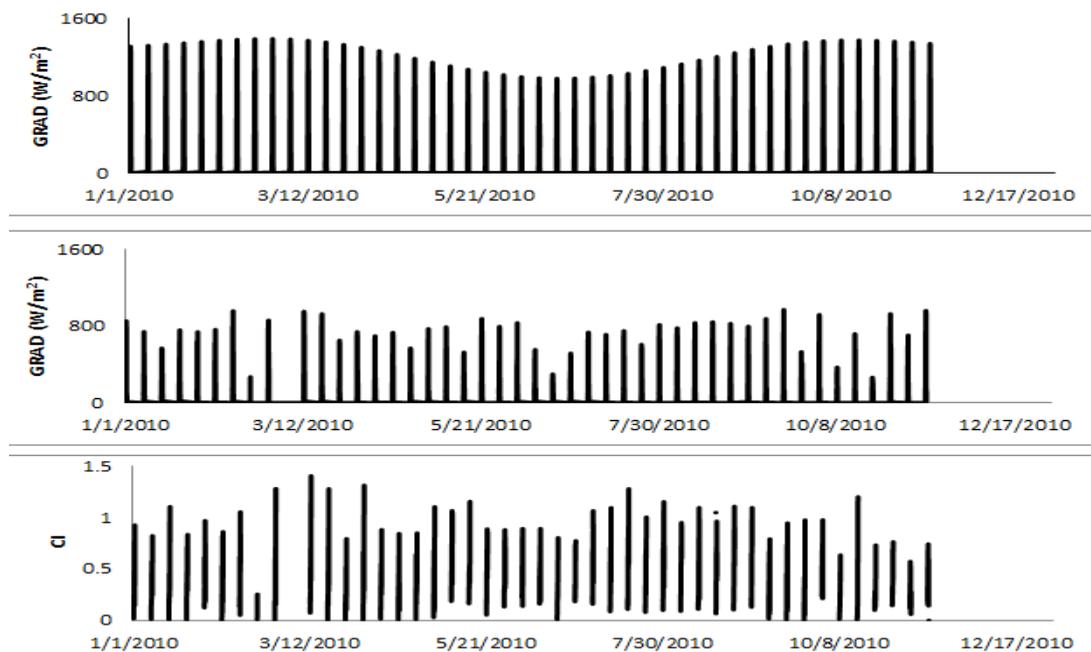
Konsentrasi maksimum rata-rata dari ozon permukaan pada musim hujan lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi maksimum rata-rata ozon permukaan pada musim kemarau. Ini disebabkan kemungkinan proses fotoreaksi lebih efektif dan lajunya lebih besar pada musim penghujan, dengan asumsi sumber prekursor adalah tetap. Analisis lebih lanjut menunjukkan fluks intensitas radiasi matahari pada musim penghujan lebih besar dibandingkan pada musim kemarau. Grafik penggambaran data GRAD pada Gambar 4.43 menunjukkan fluks intensitas radiasi pada bulan Januari – Maret lebih tinggi dibandingkan dengan fluks pada bulan Juni – Agustus. Nilai ini diperoleh dengan nilai CI (indeks kecerahan) yang relatif sama.



Gambar 4.43. Profil GRAD, NO_2 , ozon permukaan and dan rata-rata maksimum konsentrasi ozon musim kemarau (atas) dan musim hujan (bawah)

Nilai indeks kecerahan atmosfer seperti pada Gambar 4.43, dapat diinterpretasi sebagai akumulasi pencemar harian yang memoengaruhi intensitas matahari pada saat tutupan mendung minimum (Assomadi, Widodo, & Hermana, 2015). Dengan demikian perubahan level ozon pada kasus ini lebih besar karena perubahan fluks radiasi baik pada musim kemarau maupun musim hujan.

Hal menarik lain dari fakta yang ditampilkan dari Gambar 4.41 adalah pola perubahan konsentrasi NO_2 . Data menunjukkan bahwa perubahan $[\text{NO}_2]$ berbeda dengan pola siklus harian ozon. Ditunjukkan pada awal dan akhir fase 3, level $[\text{NO}_2]$ adalah paling besar. Sedangkan selama tengah hari level $[\text{NO}_2]$ paling rendah sepanjang hari. Pola ini berkebalikan dengan pola perubahan $[\text{O}_3]$. Secara keseluruhan pola perubahan $[\text{O}_3]$, $[\text{NO}_2]$, dan GRAD didasarkan pada data maksimum harian yang diolah ditunjukkan pada Gambar 4.44. Pada gambar tersebut nampak kekompleksan hubungan antar parameter-parameter. Untuk kajian lebih lanjut, diperlukan tinjauan teori kinetik untuk menjelaskan hal tersebut.



Gambar 4.44. Estimasi fluks radiasi matahari (atas), data observasi (tengah), dan nilai indeks kecerahan atmosfer (bawah) di Surabaya tahun 2010 (Assomadi, et al. 2015)

4.5.2.2. Hubungan parameter-parameter kajian untuk prediksi kinetika pembentukan ozon permukaan melalui fotoreaksi kimia

Dalam teori, gas NO₂ merupakan pencemar primer. Gas ini adalah pencemar yang diemisikan langsung dari sumbernya. Beberapa sumber yang ada di area perkotaan utamanya pembakaran bahan bakar mengandung atom nitrogen (N) dalam senyawanya. Bahan bakar tersebut antara lain bahan bakar fosil (solar/minyak diesel) yang digunakan dalam aktivitas perkotaan seperti transportasi, industri ataupun pembakaran dan degradasi oksidasi zat mengandung N di kegiatan domestik, seperti pembakaran kayu bakar dan lain-lain. Dengan demikian, perubahan [NO₂] di atmosfer permukaan merupakan konsekuensi dari aktivitas perkotaan.

Dalam kenyataannya, Surabaya sebagai kota besar yang mapan mempunyai aktifitas dalam siklus yang relatif tetap sepanjang waktu. Kegiatan industri dan domestik beroperasi hampir kontinu dan memberikan beban pencemar yang relatif tetap. Sedangkan kegiatan transportasi mempunyai pola yang khusus. Kegiatan transportasi memberikan beban yang besar terutama selama jam puncak sekitar pukul 8 pagi dan sekitar pada pukul 6 sore pada setiap hari kerja (Hermana, Wilujeng, Assomadi, & Sudiby, 2013). Hal ini cukup menjelaskan bahwa peningkatan [NO₂] saat pagi hari (awal fase 1) sesuai dengan aktivitas puncak beban transportasi.

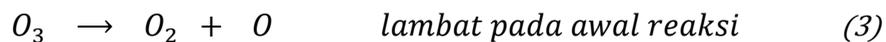
Saat siang hari [NO₂] menurun sedangkan fluks radiasi matahari meningkat, diikuti pembentukan ozon permukaan karena fotoreaksi. Penjelasan ini dikuatkan dengan meningkatnya [O₃] di atmosfer. Ketika intensitas radiasi telah mencukupi untuk inisiasi reaksi radikal, proses fotoreaksi segera terjadi. Gas NO₂ terpecah menjadi radikal NO (*nitrogen monoxy-radical*) dan radikal O (*oxy-radical*). Proses ini semakin cepat dengan meningkatnya fluks intensitas sampai tengah hari (matahari menuju zenith). Akibatnya konsentrasi gas NO₂ menurun sedangkan NO dan O akan meningkat dalam reaksi ini. Reaksi ini dinamakan inisiasi radikal dalam fotokimia.



Tahap selanjutnya terjadi secara simultan dengan reaksi sebelumnya. Radikal O yang terbentuk pada reaksi 1 secara cepat membentuk gas ozon ketika bertemu dan bertumbukan dengan molekul-molekul oksigen (O₂) bebas di atmosfer.

Proses ini dinamakan propagasi, reaksi cepat antara radikal dengan molekul lain (bukan radikal). Semakin banyak radikal O terbentuk dari proses inisiasi maka semakin banyak ozon yang terbentuk dari rangkaian proses fotokimia ini. Bagaimanapun gas oksigen merupakan reagen yang tidak terbatas dalam proses fotokimia ini. Keberadaannya di atmosfer sekitar 20 % dan mengalami siklus oksigen, sehingga tidak habis. Dengan demikian, maka proses pembentukan ozon di atmosfer bawah ini hanya dibatasi oleh jumlah radikal O, yang secara langsung dibatasi oleh NO₂ (prekursor) dan GRAD.

Pada arah yang lain, molekul-molekul ozon yang terbentuk dapat mengalami pemecahan kembali menjadi O₂ dan O dengan laju yang lebih rendah dari laju pembentukannya pada awal reaksi.



Pola pada fase 1 mengikuti reaksi-reaksi di atas. Intensitas radiasi yang semakin besar menghasilkan ozon permukaan terbentuk yang semakin besar juga, dan nitrogen dioksida yang tersisa semakin menurun. Pada fase 2, dengan menurunnya intensitas radiasi matahari, proses pemecahan NO₂ menjadi radikal NO dan O juga menurun. Proses propagasi berlangsung semakin lambat. Pada fase ini karena akumulasi ozon sangat besar dan GRAD mulai menurun, maka reaksi balik (pemecahan ozon) berlangsung cepat. Konsentrasi ozon cepat tereduksi dan konsentrasi NO₂ cepat naik. Fenomena ini berlangsung sampai dicapainya fase 3. Pada fase 3 ini, ozon yang telah dipecah menjadi O₂ dan O dapat bergabung kembali dengan NO membentuk NO₂. Proses ini dinamakan terminasi.



Reaksi-reaksi 1 sampai dengan reaksi 4 dapat diklasifikasi dalam dua kategori, yaitu reaksi pembentukan ozon (fase 1) dan reaksi pemecahan ozon (fase 2) dalam siklus harian ozon permukaan. Dalam kajian lingkungan, reaksi pembentukan ozon merupakan hal yang lebih signifikan pengaruhnya pada kualitas atmosfer.

Proses berikutnya (pemecahan ozon) sangat tergantung pada jumlah ozon terbentuk pada fase sebelumnya. Dengan demikian, maka reaksi pembentukan (fase 1) dapat memberikan informasi lebih lanjut pada langkah penurunan konsentrasi ozon di atmosfer. Untuk itu, kajian kinetik dan model matematik difokuskan pada

reaksi pembentukan ozon. Dalam penyederhanaan masalah lingkungan, fenomena-fenomena lingkungan dapat didekati dengan model matematika (Widodo, 2012).

Berikut ini adalah penyederhanaan kinetika reaksi dihubungkan dengan data yang tersedia dari pengukuran $[O_3]$, $[NO_2]$, dan GRAD di kota Surabaya. Mekanisme reaksi seperti tertulis pada reaksi 1 dan reaksi 2 dapat digabung dan dinyatakan ulang sebagai berikut:



Dari persamaan total reaksi 5 dan reaksi 6, pendekatan kinetika reaksi yang menyatakan perubahan konsentrasi dalam kurun waktu tertentu atau kecepatan reaksi dapat dituliskan:

$$\frac{d[O]}{dt} = k_1[NO_2]hv - k_2[O][O_2] \quad (4.104)$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = k_2[O][O_2] \quad (4.105)$$

Di lapangan, fluks radiasi berubah selama proses pembentukan ozon, dan jumlah ozon terukur sebanding dengan fluks radiasi. Dengan demikian sangat penting memasukkan GRAD sebagai salah satu variabel dalam reaksi, bukan sebagai pengondisi reaksi. GRAD dapat diasumsikan sebagai reaktan, seperti memasukkan suhu dalam perhitungan reaksi.

Analisis lebih lanjut dapat dilakukan jika reaksi dalam keadaan *steady*, laju pembentukan ozon sama dengan laju pemecahan ozon. Kondisi ini secara molekuler selalu terjadi, walaupun pada reaksi total baru tercapai jika sudah dalam kesetimbangan. Pada asumsi *steady state* maka perubahan $[O]$ adalah nol, sehingga persamaan 4.104 dapat disusun ulang menjadi:

$$k_1[NO_2]hv - k_2[O][O_2] = 0 \quad (4.106)$$

$$[O] = \frac{k_1[NO_2]hv}{k_2[O_2]} \quad (4.107)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4.107 ke persamaan 4.105 maka diperoleh:

$$\frac{d[O_3]}{dt} = k_2 \frac{k_1[NO_2]hv}{k_2[O_2]} [O_2] = k_1[NO_2]hv \quad (4.108)$$

Dalam aturan dalam kinetika reaksi dijelaskan laju reaksi total hanya ditentukan oleh fase reaksi yang paling lambat. Dalam kedua reaksi di atas, proses inisiasi NO_2 menjadi NO dan O berlangsung lebih lambat dibanding dengan proses propagasi O terhadap O_2 membentuk O_3 . Sehingga reaksi pembentukan ozon hanya ditentukan

oleh NO_2 dan GRAD. Menyelesaikan persamaan 4.108, diperoleh hubungan $[O_3]$ dengan $[NO_2]$ dan hv (GRAD) dalam persamaan integrasi berikut:

$$\int_0^t d[O_3] = k_1[NO_2]hv \int_0^t dt \quad (4.109)$$

$$[O_3]_t = [O_3]_0 + k_1[NO_2]hv.t \quad (4.110)$$

Persamaan 4.110 secara khusus diaplikasikan dalam reaktor asumsi tanpa ada pertukaran panas selama reaksi pada kedua reaktan dan perubahan GRAD menjadi panas.

Nilai $[NO_2]$ pada persamaan di atas menyatakan konsentrasi awal dalam sebuah reaksi. Sedangkan di lapangan, konsentrasi NO_2 terukur merupakan konsentrasi sisa yang ada di atmosfer. Dengan demikian diperlukan konversi dari konsentrasi NO_2 awal ($[NO_2]$) menjadi konsentrasi NO_2 sisa $[NO_2]_r$. Pada sistem reaksi ini konversi tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan:

$$[NO_2] = \frac{k_i}{[NO_2]_r} \quad (4.111)$$

Pada sistem reaksi di atmosfer perkotaan, reaksi terjadi dengan variasi reaktan dan intensitas radiasi. Menggunakan persamaan 4.111 dan mengasumsikan konsentrasi ozon awal adalah nol, maka persamaan 4.110 dapat diselesaikan menjadi:

$$[O_3]_t = [O_3]_0 + k_1 k_i \frac{hv_t}{[NO_2]_r} = k \frac{hv_t}{[NO_2]_r} \quad (4.112)$$

Persamaan 4.112 ini menunjukkan asumsi bahwa reaksi tidak tergantung pada rangkaian reaksi, baik sebelumnya maupun sesudahnya (tidak ada akumulasi). Data konsentrasi yang diukur bersamaan dengan reaksi yang terjadi, sehingga ketiga parameter menggambarkan kondisi yang sama. Dalam hal ini hv (foton) adalah fluks radiasi terukur (GRAD). Konstanta laju reaksi (k) dari persamaan 4.112 spesifik untuk NO_2 dapat ditulis sebagai (Assomadi, et al. 2016):

$$k_{NO_2} = \frac{[O_3]_t[NO_2]_r}{hv_t} \sim \frac{(\mu g/m^3)^2}{watt/m^2} = \frac{(\mu g/m^2)^2}{watt} \quad (4.113)$$

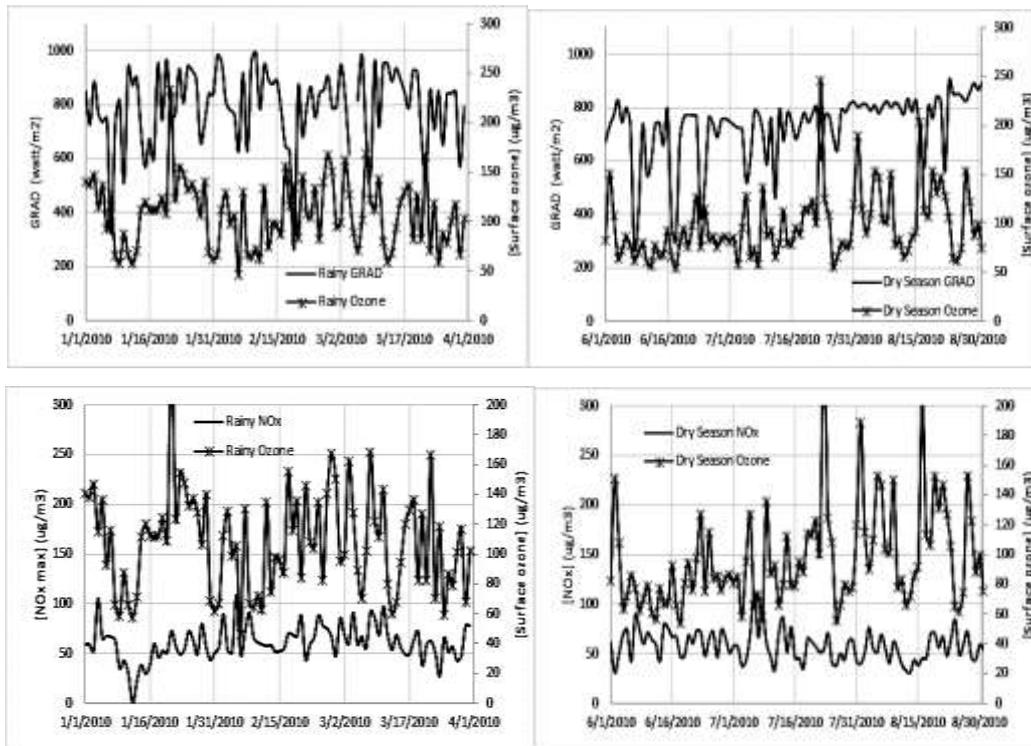
4.5.2.3. Aplikasi Persamaan Kinetika-Matematika untuk Data Kota Surabaya

Menggunakan persamaan 4.112 untuk mengolah data rata-rata dalam dua musim telah menghasilkan derajat kepastian yang baik dalam penerapan model persamaan di atas. Hasil dari olahan data adalah sebagai berikut:

1. Semua data diresume dua mingguan seperti pada Gambar 4.45 dan menghasilkan nilai rata-rata tiap parameter dalam dua musim pada fase pembentukan. Nilai rata-rata tersebut ditampilkan pada Tabel 4.18.

Table 4.18. Rata-rata GRAD, sisa $[\text{NO}_2]$, dan $[\text{O}_3]$ terbentuk dalam fase 1

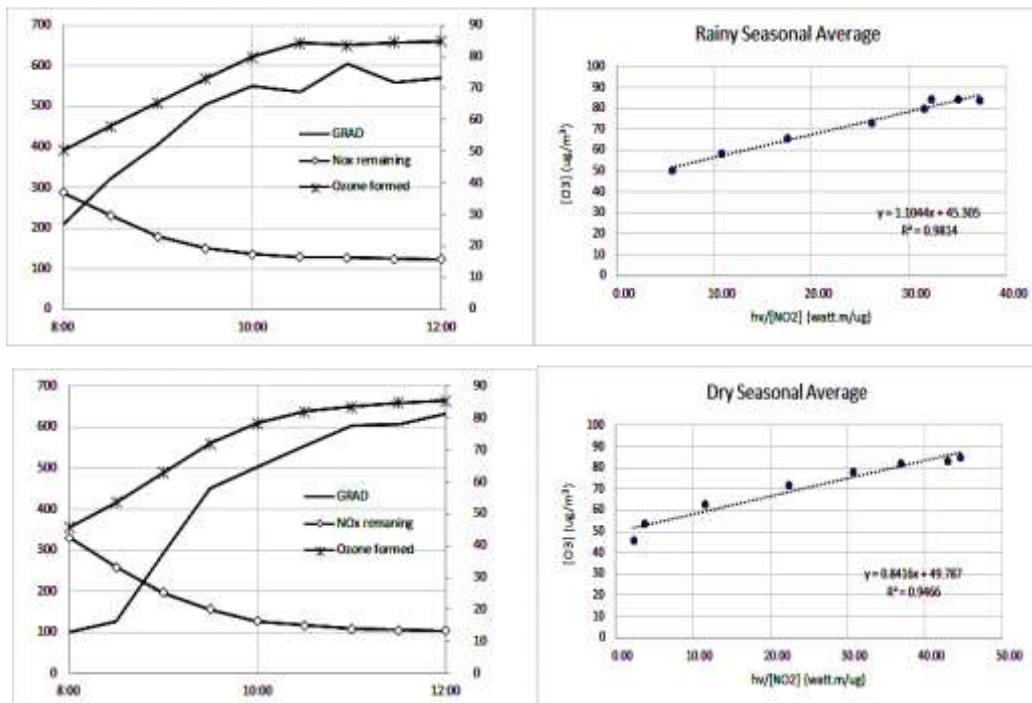
waktu	3 bulan kemarau (Jun – Aug. 2010)				3 bulan penghujan (Jan -Mar 2010)			
	GRAD (watt/m ²)	$[\text{NO}_2]_r$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$[\text{O}_3]$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$h\nu$ $[\text{NO}_2]$	GRAD (watt/m ²)	$[\text{NO}_2]_r$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$[\text{O}_3]$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$h\nu$ $[\text{NO}_2]$
8:00	101.6	42.6	45.8	2.4	209.8	36.9	50.4	5.7
8:30	127.6	33.2	53.6	3.8	320.8	29.7	58.1	10.8
9:00	292.8	25.3	63.0	11.6	404.1	23.0	65.4	17.6
9:30	450.2	20.1	72.0	22.4	504.4	19.3	73.0	26.2
10:00	502.1	16.3	78.3	30.7	549.2	17.4	80.0	31.6
10:30	555.9	15.1	81.9	36.9	536.9	16.6	84.3	32.4
11:00	603.2	14.0	83.4	43.0	605.4	16.2	83.7	37.3
11:30	606.0	13.6	84.8	44.6	559.7	16.0	84.5	35.0
12:00	632.3	13.4	85.4	47.1	571.0	15.7	85.0	36.3
12:30	628.4	12.2	84.1	51.6	506.3	15.0	82.4	33.8



Gambar 4.45. Pola konsentrasi maksimum ozone, NO_2 , dan GRAD

2. Menggunakan data-data pada Tabel 4.18 dan analisis grafik dengan regresi linier, telah didapatkan hubungan linier yang baik untuk parameter-parameter analisis. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.46.

Menurut persamaan 4.112 parameter $[O_3]_t$ dan $\frac{hv_t}{[NO_2]_r}$ menunjukkan hubungan linear dengan kemiringan k (konstanta reaksi). Hal ini sesuai dengan hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 4.44. Nampak pada analisis regresi, hubungan ini menghasilkan nilai R mendekati 1 ($R^2 > 0.9$) baik pada musim kemarau maupun musim penghujan. Nilai k untuk kedua musim adalah $1.1044 \frac{(\mu g/m^2)^2}{watt}$ untuk musim penghujan dan $0.9466 \frac{(\mu g/m^2)^2}{watt}$ untuk musim kemarau. Nilai slope atau konstanta kinetika reaksi untuk musim hujan lebih besar daripada slope untuk musim kemarau. Ini mengartikan bahwa faktor $\frac{hv_t}{[NO_2]_r}$ lebih dominan pada musim penghujan dibandingkan dengan musim kemarau.



Gambar 4.46. Kecenderungan GRAD, $[NO_2]$, $[O_3]$ rata-rata dan regresi linear $[O_3] - \frac{hv_t}{[NO_2]_r}$ pada musim penghujan (atas) dan musim kemarau (bawah)

Dari hasil yang diperoleh ini, maka persamaan 4.112 selanjutnya akan digunakan sebagai penjelasan pengaruh radiasi dan prekursor terhadap konsentrasi dispersi

pencemar di atmosfer perkotaan. Persamaan ini akan disubstitusi pada *decay constant* pada model dispersi sebagai S_m .

4.6. Dispersi Pencemaran Udara dalam arah dan besar kecepatan angin homogen

Beberapa ringkasan dari hasil sub bab 4.4 dan 4.5 tentang pendekatan awal dispersi pencemar dari satu titik sumber pencemar adalah sebagai berikut:

1. Perubahan konsentrasi kontaminan pada volume kontrol karena difusi, adveksi (fisika) dan *sinks material* (S_m). Jika fluida tidak terkompresi (*incompressible*), dengan kecepatan alir fluida sebesar v maka dapat dinyatakan dalam persamaan seperti telah dihasilkan pada Persamaan 4.91. Pada pergerakan fluida searah sumbu x saja (1D), persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial C}{\partial x} + S_m = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4.114)$$

Jika sumber kontinyu dan mencapai tunak (*steady state*), maka $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$, sehingga

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{D_x}{v} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4.115)$$

2. Jika S_m diabaikan, dianggap tidak ada sumber lain atau *sink*, dan tidak ada pergerakan fluida ($v = 0$) maka persamaan diatas diselesaikan dengan inversi Fourier seperti persamaan 4.95 dan persamaan 4.96.
3. Penerapan prinsip superposisi, jika ada *boundary* yang menghalangi aliran menghasilkan persamaan dispersi pada arah sumbu x seperti persamaan 4.100
4. Penerapan prinsip superposisi pada adanya *mixing height* (MH) pada arah dispersi vertikal akan diperoleh dua persamaan yaitu:
 - (a). Pada *altitude* di atas sumber pencemar ($z > z_0$); persamaan dispersi dapat dituliskan seperti persamaan 4.101 dan persamaan 4.102
 - (b). Pada *altitude* di bawah sumber pencemar ($z < z_0$); persamaan dispersi menggunakan persamaan 4.103.

4.6.1. Model Dispersi dari Sumber Titik

Dari beberapa ringkasan di atas, dengan prinsip similaritas, dikembangkan beberapa persamaan lain sebagai berikut:

1. jika ada *barier* ke arah dispersi sumbu y, maka proses difusi ke arah tersebut diturunkan dari ringkasan no 3 dengan mengganti arah koordinat ke sumbu y. Dengan demikian persamaan dapat disusun ulang menjadi:

$$C(y, t) = \frac{m_a}{A\sqrt{4\pi D_y t}} \left(\exp\left(\frac{-y^2}{4D_y t}\right) + \exp\left(\frac{-(y-2L)^2}{4D_y t}\right) \right) \quad (4.116)$$

2. Konsentrasi pada titik penerima tertentu pada koordinat dan waktu (x,y,z,t) merupakan akumulasi dari konsentrasi hasil dispersi pada persamaan-persamaan di atas. Menggunakan ringkasan 1 untuk x,y,z diperoleh:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_m$$

Jika kecepatan pada arah y dan z diabaikan (difusi dominan) dan difusi ke arah x lebih kecil dibanding dengan adveksinya maka persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_m \quad (4.117)$$

Jika sumber kontinyu sehingga mencapai *steady state* ($dC/dt = 0$) maka

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_m$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \left(\frac{D_y}{v_x} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{D_z}{v_x} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + \frac{S_m}{v_x} \quad (4.118)$$

Menggunakan penyelesaian seperti di atas, diperoleh:

$$C(x, y, z, t) = \frac{m_a x}{A 4\pi t \sqrt{D_y D_z}} \left(\exp\left(\frac{-y^2}{4D_y t}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-z^2}{4D_z t}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right);$$

$$x = v \cdot t$$

$$C(x, y, z, t) = \frac{m_a v}{A 4\pi \sqrt{D_y D_z}} \left(\exp\left(\frac{-y^2 v}{4D_y x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-z^2 v}{4D_z x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right) =$$

$$\frac{m_a}{t 4\pi x \sqrt{D_y D_z}} \left(\exp\left(\frac{-y^2 v}{4D_y x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-z^2 v}{4D_z x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right) =$$

$$\frac{q}{4\pi x \sqrt{D_y D_z}} \left(\exp\left(\frac{-y^2 v}{4D_y x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-z^2 v}{4D_z x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right) \quad (4.119)$$

$$\frac{v}{A} = \frac{1}{tx} ; q = \frac{m_a}{t}$$

3. Jika ada boundary pada arah y dan z, maka ditambahkan prinsip superposisi pada suku difusi pada y dan z, dan persamaan terakhir dapat dituliskan menjadi

$$C(x, y, z,) = \frac{q}{4\pi x \sqrt{D_y D_z}} \left(\exp\left(\frac{-y^2 v}{4D_y x}\right) + \exp\left(\frac{-(y-2L)^2 v}{4D_y x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right) \quad (4.120)$$

Persamaan terakhir ini dengan memasukkan asumsi tidak ada barrier pada arah y, arah dan kecepatan angin homogen searah sumbu-x, dapat diselesaikan menjadi **persamaan model dispersi Gauss** untuk satu titik sumber kontinyu. Persamaan di atas merupakan model dispersi normal dengan arah adveksi sejajar sumbu x dan sumber berada di pusat koordinat (x=0, y=0). Jika arah adveksi tidak sejajar sumbu x dan sumber pencemar tidak pada titik (0,0) maka diperlukan pendekatan geometri untuk mengtransformasi koordinat agar memenuhi persamaan tersebut.

4.6.2. Model Dispersi dari Sumber Garis

Dalam teori dasar matematika, garis adalah kumpulan titik-titik yang membentuk pola fungsi tertentu (fungsi garis). Dengan demikian jika sumber pencemar adalah garis, maka sumber garis tersebut dapat diasumsikan merupakan kumpulan banyak sumber titik yang bejajar membentuk pola fungsi garis tertentu. Pada sumber garis yang infinite

$$C_L(x, y, z,) = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} d C_P(x, y, z,) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_P(x, y, z,)$$

Dengan asumsi garis sepanjang sumbu y, maka Dy akan diabaikan, sehingga persamaan ∞ point source dijumlahkan menjadi

$$C_L(x, y, z,) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi D_z x}} \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right)$$

Pada sumber garis yang *finite* terbatas pada L1 dan L2, maka:

$$C_L(x, y, z,) = \int_{y=L1}^{y=L2} d C_P(x, y, z,) = \sum_{L1}^{L2} C_P(x, y, z,)$$

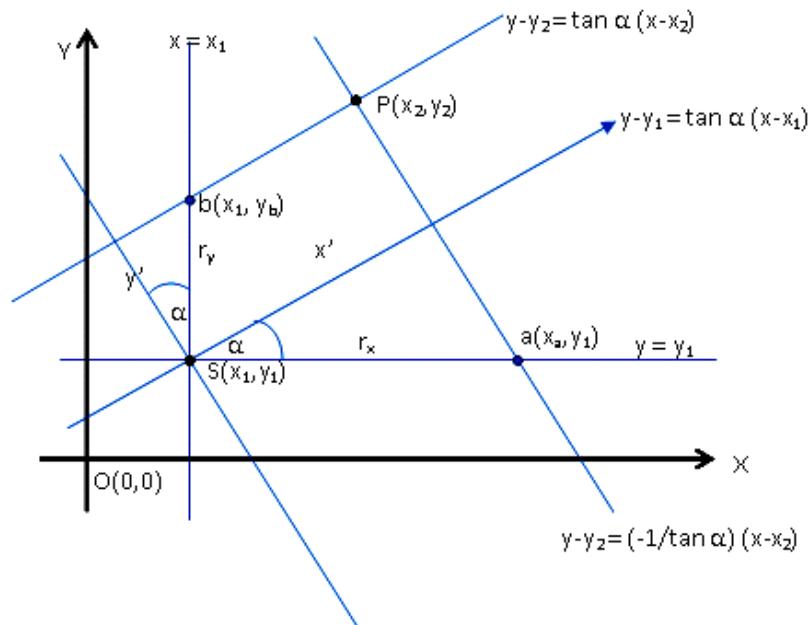
Maka persamaan *infinite* di atas dimodifikasi menjadi

$$C_L(x, y, z,) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi D_z x}} \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sin\theta\left(\frac{L}{2}-y\right)-x \cos\theta}{\sqrt{2}D_y x}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\sin\theta\left(\frac{L}{2}+y\right)+x \cos\theta}{\sqrt{2}D_y x}\right) \right] \quad (4.121)$$

4.6.3. Transformasi Koordinat Kartesius, mengikuti arah vektor angin

4.6.1.1. Sumber titik

Jika suatu titik sumber $S(x_1, y_1)$ dilewati angin dengan arah α dari sumbu x (timur = 0), maka jarak penerima $P(x_2, y_2)$ searah angin (*downstream*) dapat dinyatakan sebagai x' dan jarak melintang tegak lurus *downstream* dapat dinyatakan sebagai y' . Menggunakan pendekatan analisis garis dan titik pada diagram kartesius pada Gambar 4.47 berikut:



Gambar 4.47. Sistem koordinat kartesius dan kedudukan point source (S) dan receptor (P)

Dari analisis geometri pada sistem gambar di atas, diperoleh:

1. Titik potong garis $y - y_2 = \tan \alpha (x - x_2)$ dengan $x = x_1$ pada titik $b(x_1, y_b)$;

$$y - y_2 = \tan \alpha (x - x_2)$$

substitusi x dengan x_1 dan y dengan y_b , maka diperoleh:

$$y_b = \tan \alpha (x_1 - x_2) + y_2$$

selanjutnya, dengan menentukan panjang $r_y = y_b - y_1$ dan substitusi dengan persamaan di atas, diperoleh:

$$r_y = y_b - y_1 = \tan \alpha (x_1 - x_2) + y_2 - y_1$$

dengan mengambil y' sebagai jarak tegak lurus dari garis $y - y_1 = \tan \alpha (x - x_1)$

dengan garis sejajar dengannya melewati P , maka diperoleh:

$$y' = r_y \cos \alpha = (y_2 - y_1 + (x_1 - x_2) \tan \alpha) \cos \alpha$$

dalam aturan trigonometri,

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \Rightarrow y' = (y_2 - y_1) \cos \alpha + (x_1 - x_2) \sin \alpha \quad (4.122)$$

2. Titik potong garis $y - y_2 = (-1/\tan \alpha) (x - x_2)$ dengan $y = y_1$ pada titik $a(x_a, y_1)$;

$$y - y_2 = -\frac{1}{\tan \alpha} (x - x_2)$$

substitusi x dengan x_a dan y dengan y_1 , maka diperoleh:

$$y_1 - y_2 = -\frac{1}{\tan \alpha} (x_a - x_2)$$

$$x_a = x_2 - (y_1 - y_2) \tan \alpha$$

selanjutnya, dengan menentukan panjang $r_x = x_a - x_1$ dan substitusi dengan persamaan di atas, diperoleh:

$$r_x = x_a - x_1 = x_2 - (y_1 - y_2) \tan \alpha - x_1$$

$$r_x = x_a - x_1 = x_2 - x_1 - (y_1 - y_2) \tan \alpha$$

dengan mengambil x' sebagai jarak titik S dengan garis $y - y_2 = -\frac{1}{\tan \alpha} (x - x_2)$ maka diperoleh:

$$x' = r_x \cos \alpha = (x_2 - x_1 - (y_1 - y_2) \tan \alpha) \cos \alpha$$

dalam aturan trigonometri,

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \Rightarrow x' = (x_2 - x_1) \cos \alpha - (y_1 - y_2) \sin \alpha \quad (4.123)$$

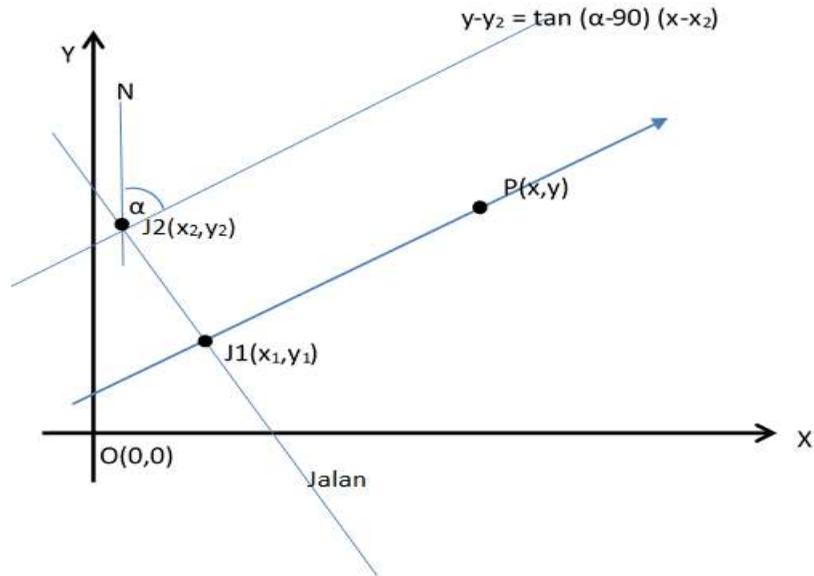
Transformasi koordinat x' dan y' merupakan koordinat yang dinamis mengikuti arah vektor angin α , yang melewati sumber titik $S(x_1, y_1)$ sampai ke *receptor* $P(x_2, y_2)$ pada sistem koordinat kartesius asal (x, y) . Dalam koordinat hasil transformasi ini titik S dinyatakan sebagai $x'=0$ dan $y'=0$, sebagai titik asal sumber sehingga $S(x'=0, y'=0)$ sedangkan semua titik *receptor* dapat dinyatakan dalam $P(x', y')$.

Memasukkan hasil transformasi koordinat ini pada persamaan dispersi, dengan asumsi tidak ada barrier pada arah sumbu x dan y , maka persamaan dispersi pencemar dapat dituliskan menjadi:

$$C(x, y, z, t) = \frac{q}{4\pi x' \sqrt{D_y D_z}} \exp\left(\frac{-y'^2 v}{4D_y x'}\right) \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x'}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x'}\right) \right) \quad (4.124)$$

4.6.1.2. Sumber Garis

Seperti halnya pada sumber titik transformasi koordinat kartesian, untuk menjalankan model dispersi pada sumber garis juga diperlukan pendekatan transformasi koordinat yang mengikuti perubahan arah angin.



Gambar 4.48. Sistem koordinat kartesian dan kedudukan *line source* (J) dan penerima (P)

Seperti terlihat pada Gambar 4.48, jarak penerima (P) dari titik potong garis angin dengan jalan didekati dari analisis geometri berikut:

Gradien jalan (m) dan sudut arah jalan dari N:

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}; \quad A = \text{atan}(m)$$

Konstanta pada garis jalan (k) $\rightarrow y = mx + k$

$$k = y_1 - mx_1$$

Selisih sudut jalan dengan arah angin (B)

$$B = \alpha - 90 + A$$

Jarak (d) penerima dengan jalan mengikuti arah angin adalah

$$d = \frac{((mx_1 + k - y) / \sqrt{(1 + m^2)})}{\sin B} \quad (4.125)$$

Titik potong garis angin melewati pengamat dengan jalan $J1(x_1, y_1) = (x_e, y_e)$

$$x_e = \frac{m_a x - mx_1 - y + y_1}{m_a - m}; \quad y_e = m_1(x_e - x_1) + y_1 \quad (4.126)$$

4.6.4. Rekap dan penerapan model dispersi pencemar atmosfer dari *point source* dan *line source* kontinyu

Berdasar pada persamaan-persamaan di atas maka model dispersi dari sumber titik kontinyu dalam keadaan steady pada (x_1, y_1) dan receiver pada (x, y) dengan arah aliran fluida homogen membentuk sudut α dari sumbu y, adalah:

$$C(x, y, z,) = \frac{q}{4\pi x' \sqrt{D_y D_z}} \exp\left(\frac{-y'^2 v}{4D_y x'}\right) \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x'}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x'}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x'}{v}\right) \right)$$

$$x' = (x - x_1) \cos \alpha - (y_1 - y) \sin \alpha$$

$$y' = (y - y_1) \cos \alpha + (x_1 - x) \sin \alpha$$

$$\frac{\lambda x'}{v} = \frac{dC}{dt} = kC^n$$

Substitusi persamaan kinetika dengan hasil kajian kinetika maka persamaan dispersi pencemar adalah:

$$C(x, y, z,) = \frac{q}{4\pi x' \sqrt{D_y D_z}} \exp\left(\frac{-y'^2 v}{4D_y x'}\right) \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x'}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x'}\right) \right) \left(\exp(-kC^n) \right) \quad (4.127)$$

Persamaan ini digunakan untuk membentuk *script* MATLAB untuk menggambarkan pola dispersi dalam 3-D, jika ditentukan pada ketinggian pengamat tertentu, maka dapat digambarkan kontur 2-D sebaran pencemar dari satu sumber titik pada bidang x-y. Sedangkan untuk *line source infinite* kontinyu, digunakan persamaan

$$C_L(x, y, z,) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} D_z x} \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-\lambda x}{v}\right) \right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sin\theta\left(\frac{L}{2}-y\right)-x \cos\theta}{\sqrt{2} D_y x}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\sin\theta\left(\frac{L}{2}+y\right)+x \cos\theta}{\sqrt{2} D_y x}\right) \right]$$

Jika sumber pencemar lebih dari satu titik atau satu garis maka dispersi total pencemar di bidang x-y adalah jumlah matriks dispersi dari masing-masing sumber pencemar. Sehingga:

$$C(x, y, z,) = \sum_{i=1}^i C(x_i, y_i, H_i, q_i,) \quad (4.128)$$

Untuk keperluan pengolahan lebih lanjut maka beberapa parameter masukan ke model harus dipersiapkan yaitu:

1. Data teknis sumber pencemar: beban emisi (q , g/s); tinggi efektif sumber dari permukaan (H , m); posisi sumber (x_1 , y_1);
2. Data ambien: kecepatan angin dan arah (v , m/s; α dihitung dari $N(0)$ searah jarum jam)
3. Data konstanta *decay* atau konstanta laju reaksi, sink (k atau λ)
4. Peta wilayah dan transformasi koordinat terhadap x, y dan perhitungan skala peta

4.6.5. Menjalankan model point source dengan program MATLAB

4.6.5.1. Model sumber titik pada aplikasi MATLAB

Menjalankan model *point source* yang dihasilkan di atas dimaksudkan untuk menguji apakah persamaan yang dihasilkan dapat dijalankan dan menghasilkan nilai yang benar secara ilmiah. Langkah ini adalah verifikasi model. Untuk memudahkan evaluasi dalam verifikasi, maka perlu dibuat *script* terpisah dari *command* di MATLAB. Script ini bisa ditulis dalam M-file yang bisa dipanggil dari *command menu*. Beberapa langkah yang diperlukan untuk tujuan ini adalah:

Pertama, mengidentifikasi bidang $x-y$ untuk menggambarkan pola dispersi dalam satu peta daerah studi. Dalam disertasi ini digunakan peta Kota Surabaya dengan tanpa legend dan notasi kecuali batas wilayah. Hal ini akan memudahkan untuk memasukkan beberapa variabel (seperti jalan, lokasi *point source*, lokasi area source, lokasi RTH, *obstacle*, dan lain-lain) dan parameter yang perlu ditampilkan dalam penggambaran pola dispersi. Pada langkah ini diperlukan gambar peta dalam format gambar dan dimasukkan dalam 1 *folder* dengan *script* yang lain. Pada disertasi ini telah disiapkan peta Kota Surabaya dengan nama “AdminSby1.jpg”. Tampilan peta tersebut seperti pada Gambar 4.49.



Gambar 4.49 Contoh Peta dalam inputan model (AdminSby1.jpg)

Peta pada Gambar 4.49 di atas telah disesuaikan koordinat geometrinya (geoposisi) yaitu $7.19 - 7.36$ LS dan $112.59 - 112.85$ BT. Pada penulisan *script* LS ditulis pada sumbu y negatif, karena nol pada khatulistiwa, sedangkan BT ditulis tetap. Untuk menyederhanakan pemodelan, koordinat ini ditulis dalam asumsi bidang datar x - y , karena lengkung bumi terlalu kecil jika dibandingkan dengan luas daerah yang diambil dalam studi ini (kota Surabaya sekitar 28×17 km (xy)). Diperlukan penulisan *script* pada command windows MATLAB seperti pada Gambar 4.50, *script* tersebut adalah:

```

%% Insert Peta Administratif
img = imread('AdminSby1.jpg');
min_x = 112.59; max_x = 112.85;
min_y = -7.36; max_y = -7.19;
imagesc([min_x max_x], [min_y max_y]);
hold on;
sc = 110447;                                %skala rata-rata m/degree

```


dalam pengembangan model selanjutnya yang lebih kompleks, dan memudahkan dalam menjalankan model selanjutnya. *Script* tersebut adalah

```

%% Konstanta Difusivitas
Dify = 0.001; Difz = 0.001;           % difusivitas horizontal dan
vertikal (m)
Dy = Dify*1/sc; Dz = Difz*1/sc;       % difusifitas dalam
deg
lambda = 0.001;                       % konstanta decay

%% Point Source
%% Data beban emisi (g/s)
Q1 = 10000% beban emisi (g/s)stack-1

%% Data teknis stack
stack1 = 100                           %tinggi stack
receptor = 1.5;                         % tinggi receptor dalam
m

%%posisi stack
xs1 = 112.65; ys1 = -7.28              % posisi stack 1

H1 = stack1*1/sc;                      %Efektif      plume
dalam deg
z = receptor*1/sc;                    % tinggi receptor deg

%% membuat grid diskritisasi dalam bidang analisis
[x,y] = meshgrid
(linspace(min_x,max_x,1000),linspace(min_y,max_y,1000));
e = ones(size(x));                    %nilai background grid

%% Konversi angin ke gradien geometri
aa = (90-a)*pi/180;                   % a = arah angin ke ... dengan
acuan utara (N = 0) searah jarum jam
ma = tan((180-a)*pi/180);             % gradient arah angin terhadap
reference (east)
gcont = 2;

```

Ketiga, membuat *script* transformasi koordinat kartesius sesuai dengan perubahan arah angin. *Script* transformasi ini untuk merubah variabel bidang/ruang menjadi variabel yang sesuai dengan sifat persamaan model yang akan digambarkan. *Script* untuk hal tersebut adalah:

```

%% jarak x dan y dari sumber searah angin
xx1 = (x - xs1)*cos(aa) - (ys1 - y)*sin(aa); yy1 = (y -
ys1)*cos(aa) + (xs1 - x)*sin(aa);
v = s/sc;                               % kec angin deg/s

```

Keempat adalah membuat *script* model dispersi sesuai dengan persamaan yang dihasilkan dan beberapa boundary yang diperlukan. Perlu dipertegas bahwa program MATLAB ini mengolah model dengan matriks sehingga *script* merupakan diskritisasi model pada setiap grid (titik koordinat). *Script* untuk hal tersebut adalah:

```

%% Perhitungan konsentrasi Dispersi
c1 = 0.001*Q1*e/(4*pi*xx1*sqrt(Dy*Dz)*v)*exp(-
v*yy1*yy1/(4*Dy*xx1))*exp(-v*(z-H1)*(z-
H1)*e./(4*Dz*xx1))+exp(-(z+H1)*(z+H1)*e/(4*Dz*xx1)))*exp(-
lambda*xx1/v);
c1(isinf(c1))=0; c1(isnan(c1))=0;

```

Kelima adalah membuat plot kontur atau *surface* pola dispersi pada bidang x-y, mengatur tampilan, mengatur nilai konsentrasi, warna dan sebagainya. Plot ini juga memuat vektor angin dalam tiap grid, sehingga nampak dengan jelas arah angin dalam gambar peta kontur. *Script* untuk hal tersebut adalah:

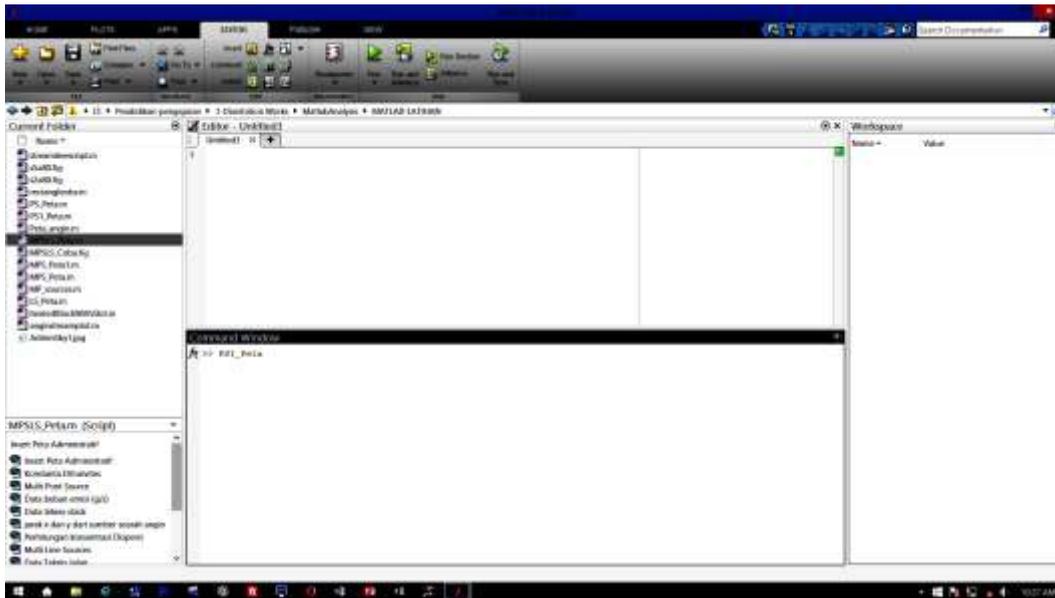
```

%% Plot Posisi Stack
plot(xs1,ys1,'ok');
%% Plot Contur dispersi
c = (c1)./(20000*11047*11047);
contour(x,y,c,10,'Fill','on');
map = [0, 1, 1
       0, 0.5, 1
       0.2, 0.7, 0.6
       1, 0.7, 0.3
       1, 0, 0];
colormap(map); c = colorbar; c.Label.String = 'Konsentrasi
Ambien (\mug/m^3)';

%% Plot Angin vektor
[x,y]= meshgrid (linspace(min_x,max_x,10),
linspace(min_y,max_y,10));
vel = v*0.00000907;
u = vel*cos((90-a)*pi/180)*ones(size(x));
w = vel*sin((90-a)*pi/180)*ones(size(y));
wind_speed = sqrt(u.^2 + w.^2 );
quiver(x,y,u,w,0.1,'b')
axis([112.59 112.85 -7.36 -7.19]);
clc

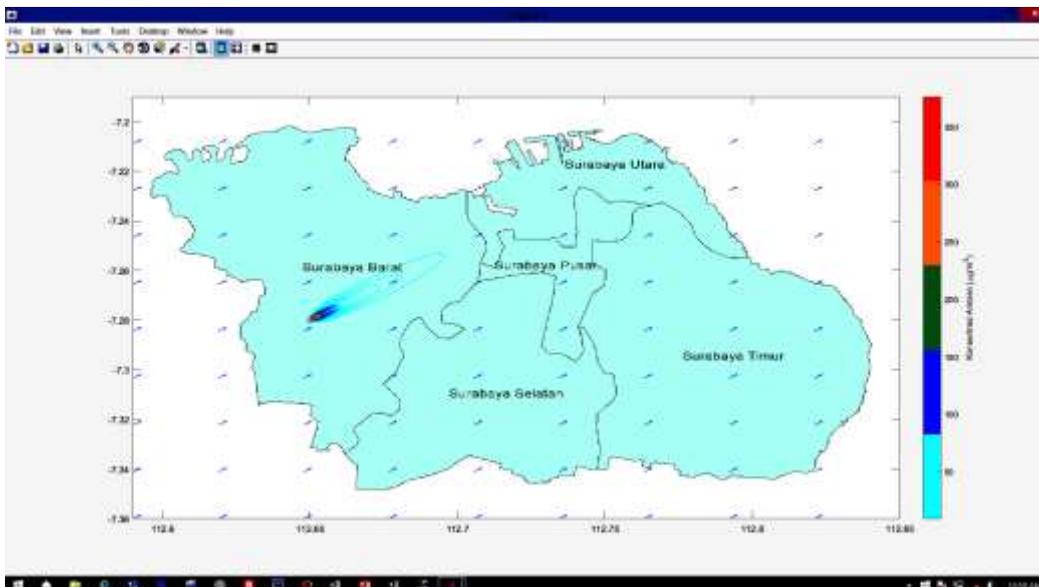
```

Setelah semua *script* ditulis, maka disimpan dengan format M-file. Menjalankan script m.file adalah dengan memanggil file tersebut di command windows. Pada disertasi ini, *script* disimpan dengan nama PS1_Peta.m. Kemudian jalankan program melalui command window. Tuliskan a = 60; s = 6; kemudian tuliskan nama file tersebut pada Command Window dan enter seperti pada Gambar 4.52. Script a = 60 menyatakan arah angin 60⁰ ke timur dari utara (N(0)), dan s = 6 menyatakan kecepatan (m/s) angin homogen dengan arah a.



Gambar 4.52 Menulis perintah memanggil M-file pada command window

Setelah *running* dengan arah angin 60° dari utara dan kecepatan angin 6 m/s selesai, maka hasil model ditampilkan dalam *workspace* dan figur. Pada *workspace* ditampilkan keterangan nilai-nilai dan dimensi matriks. Sedangkan figur ditampilkan seperti Gambar 4.53 berikut:



Gambar 4.53 Tampilan kontur diapersi pencemar satu sumber titik pada bidang x-y

4.6.5.2. Model sumber garis pada aplikasi MATLAB

Sama seperti point 6.1 menjalankan model *line source* yang dihasilkan dari model matematik diatas dimaksudkan untuk menguji apakah persamaan yang

dihasilkan dapat dijalankan dan menghasilkan nilai yang benar secara teori. Langkah ini juga merupakan verifikasi model sumber garis. Secara prinsip langkah-langkah yang digunakan adalah sama dengan 4.6.5.1, dengan beberapa perubahan. Langkah-langkah tersebut adalah:

Pertama, sama dengan point 4.6.5.1.

Kedua, mengidentifikasi data-data teknis seperti yang telah dipersiapkan, seperti data teknis panjang jalan, koordinat awal dan akhir, data ambien, dan data kinetika. Pada disertasi ini digunakan dua ruas jalan lurus yang menyambung jadi satu. Semua parameter dalam data ini dimasukkan dalam *script* sebagai inputan. Diusahakan semua data ini dipisah dengan jelas dalam penulisan *script* dan diberi keterangan agar mudah dalam pengembangan model selanjutnya yang lebih kompleks, dan memudahkan dalam menjalankan model selanjutnya. *Script* tersebut adalah:

```
%% Multi Line Sources
%% Data Teknis Jalan
x1 = 112.8; y1 = -7.32; x2 = 112.7; y2 = -7.28;
x3 = 112.7; y3 = -7.28; x4 = 112.6; y4 = -7.22;
plot([x1 x2],[y1 y2],'LineStyle','-','LineWidth',.5,'color','r');
plot([x3 x4],[y3 y4],'LineStyle','-','LineWidth',.5,'color','r');
avg_s = 30; tr_vol = 4000; QJ1 = 1000; QJ2 = 1000; HE = 0.4;
LJ = 5; % kec rata-rata (km/jam), kepadatan jalan
(kend/jam), beban emisi rata-rata (g/s)H sbr emisi (m), lebar
jalan (m)
L = LJ*1/sc; tr_sp = avg_s*1/sc; Hs = HE*1/sc;
```

Ketiga adalah membuat *script* transformasi koordinat kartesius sesuai dengan perubahan arah angin. *Script* transformasi ini untuk merubah variabel bidang/ruang menjadi variabel yang sesuai dengan sifat persamaan model yang akan digambarkan. *Script* untuk hal tersebut adalah:

```
%% jarak receptor dari line source
m1 = (y2 - y1)/(x2 - x1) ; m2 = (y4 - y3)/(x4 - x3) ;
k1 = y1 - m1*x1;k2 = y3 - m2*x3;
A1 = atan(m1)*180/pi; A2 = atan(m2)*180/pi;
arah = a-90;
B1 = arah + A1; B2 = arah + A2;
d1 = ((-y+m1*x+k1)/(1+m1^2)^0.5)/(sin(B1.*pi/180)).*1/sc;
d2 = ((-y+m2*x+k2)/(1+m2^2)^0.5)/(sin(B2.*pi/180)).*1/sc;
xe1 = (ma*x - m1*x2 - y + y2)./(ma-m1); ye1 = m1*(xe1-x2)+y2;
%titik potong lintasan angin melewati pengamat dengan jalan1
xe2 = (ma*x - m2*x4 - y + y4)./(ma-m2); ye2 = m2*(xe2-x4)+y4;
%titik potong lintasan angin melewati pengamat dengan jalan1
z = 1.5/sc ;
dz = 100*Dz;
```

Keempat adalah membuat *script* model dispersi sesuai dengan persamaan yang dihasilkan dan beberapa *boundary* yang diperlukan. Program MATLAB ini mengolah model dengan matriks sehingga *script* merupakan diskritisasi model pada setiap grid (titik koordinat). *Script* untuk hal tersebut adalah:

```

%% Dispersi line source
Le1 = abs(y2 - y1); EF1 = 0.5*Le1 - abs(ye1 - 0.5*(y2+y1));
E1= (EF1>=0).*EF1;
Le2 = abs(y4 - y3); EF2 = 0.5*Le2 - abs(ye2 - 0.5*(y4+y3));
E2= (EF2>=0).*EF2;
cJ1 = QJ1*e/(((2*pi)^0.5)* d1*dz*v)*(exp(-v*(z-Hs)*(z-Hs)*e/(
4*dz*d1))+exp(-v*(z+Hs)*(z+Hs)*e/(4*dz*d1)))*exp(-
lambda*d1/v);
cJ1(isinf(cJ1))=0; cJ1(isnan(cJ1))=0; cLS1 = cJ1.*E1;
cJ2 = QJ2*e/(((2*pi)^0.5)*d2.*dz*v)*(exp(-v*(z-Hs)*(z-Hs)*e/(
4*dz*d2))+exp(-v*(z+Hs)*(z+Hs)*e/(4*dz*d2)))*exp(-
lambda*d2./v);
cJ2(isinf(cJ2))=0; cJ2(isnan(cJ2))=0; cLS2 = cJ2.*E2;

```

Kelima adalah membuat plot kontur atau surface pola dispersi pada bidang x-y, mengatur tampilan, mengatur nilai konsentrasi, warna dan sebagainya. Plot ini juga memuat vektor angin dalam tiap grid, sehingga nampak dengan jelas arah angin dalam gambar peta kontur. *Script* untuk hal tersebut adalah:

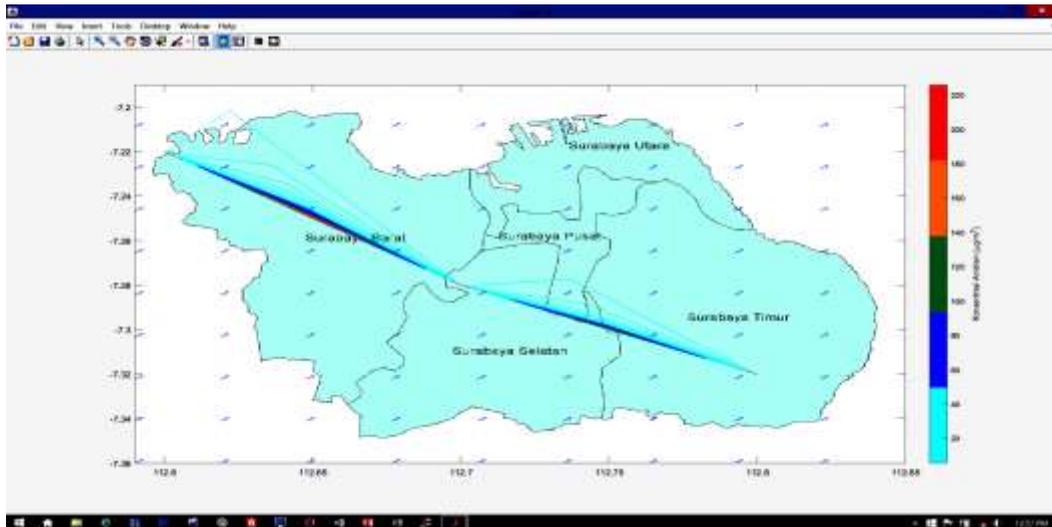
```

%% Plot Contur dispersi
c = (cLS1 +cLS2)./(20000*11047*11047);
contour(x,y,c,40,'Fill','off');
map = [0, 1, 1
       0, 0.5, 1
       0.2, 0.7, 0.6
       1, 0.7, 0.3
       1, 0, 0];
colormap(map); c = colorbar; c.Label.String = 'Konsentrasi
Ambien (\mug/m^3)';

```

Setelah semua *script* ditulis, maka disimpan dengan format M-file. Menjalankan script m.file adalah dengan memanggil file tersebut di command windows. Pada disertasi ini, *script* disimpan dengan nama LS1_Peta.m. Kemudian jalankan program melalui command window:

Tuliskan $a = 60$; $s = 6$; kemudian tuliskan nama file tersebut pada Command Window dan enter. Script $a = 60$ menyatakan arah angin 60° ke timur dari utara (N(0)), dan $s = 6$ menyatakan kecepatan (m/s) angin homogen dengan arah a . Hasil menjalankan program ini dapat dilihat pada Gambar 4.54 berikut:



Gambar 4.54 Tampilan contour diapersi pencemar dua sumber garis bidang x-y

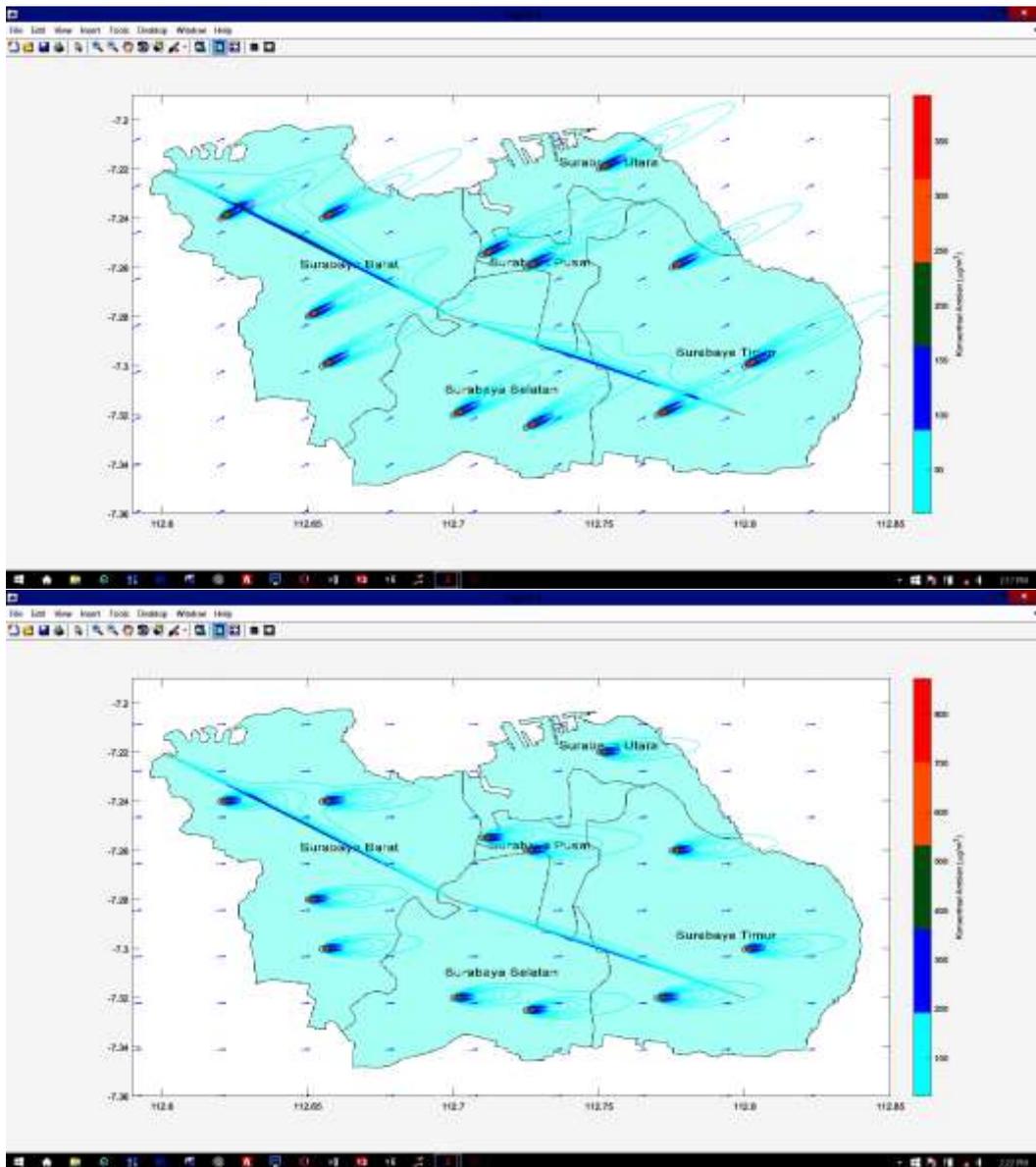
4.6.5.3. Model multi sumber titik dan multi garis pada aplikasi MATLAB

Secara prinsip model multi *point* dan multi *line sources* dapat digambarkan dengan pendekatan jumlah matriks diskrit pada tiap grid dalam bidang koordinat. Jika sumber pencemar lebih dari satu titik atau satu garis maka dispersi total pencemar di bidang x-y adalah jumlah matriks dispersi dari masing-masing sumber pencemar. Sehingga:

$$C(x, y, z,) = \sum_{i=1}^i C(x_i, y_i, H_i, q_i,) \quad (4.129)$$

Menggunakan langkah-langkah yang sama dengan point 4.6.5.1 sampai 4.6.5.3, maka model multi source ini dibuat *script* dalam m-file dan disimpan dalam MPMLS_Peta.m (*script* terlampir)

Menerapkan MPMLS_Peta dalam command window MATLAB dengan 12 point source dengan beban seragam dan ketinggian *stack* juga seragam, dan 2 jalan terhubung dengan beban jalan seragam menghasilkan pola dispersi seperti Gambar 4.55. Pada gambar tersebut *script* $a = 60$ menyatakan arah angin 60^0 ke timur dari utara (N(0)), dan $s = 6$ menyatakan kecepatan (m/s) angin homogen dengan arah a. Sedangkan *script* $a = 85$ menyatakan arah angin 85^0 ke timur dari utara (N(0)), dan $s = 4$ menyatakan kecepatan (m/s) angin homogen dengan arah a.



Gambar 4.55 Tampilan kontur diapersi pencemar *multi source* dengan arah dan kecepatan angin berbeda (atas $a = 60$, $s = 6$; bawah $a = 85$, $s = 4$)

4.7. Verifikasi Model Terbangun

Model terbangun diverifikasi untuk meyakinkan bahwa model tersebut memberikan estimasi perhitungan dispersi sesuai dengan 1) prinsip-prinsip teori yang mendasarinya yaitu adveksi dan difusi; 2) model terdahulu yang telah diaplikasikan. Verifikasi dengan model terdahulu yang telah diaplikasikan, hasil estimasi model terbangun akan dibandingkan dengan hasil estimasi model dispersi Gauss. Model Gauss dipilih karena penggunaannya telah umum untuk prediksi pencemar udara, kajian lingkungan, dan sebagainya. Model ini memberikan estimasi yang baik dan diterima secara internasional. Semua perhitungan dan pola dispersi yang dihasilkan dalam penelitian ini dibangun menggunakan persamaan matematika dengan bantuan program excel Microsoft Office Professional Plus 2013 (ID: 00216-59120-14933-AA343) dan matlab versi R2013a (8.1.0.604) 32-bit (win 32) Februari 15, 2013 (lisensi manager kampus ITS, dengan lisensi number 872393).

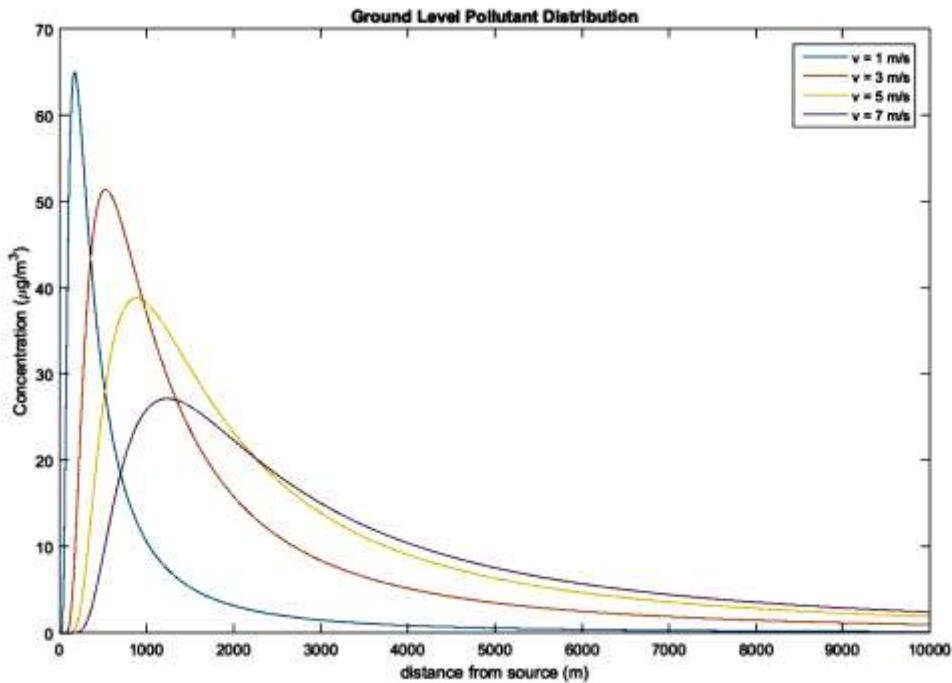
4.7.1. Verifikasi dengan teori dispersi dan kajian analisis

Dalam subbab dispersi pencemar (bab 2) dinyatakan bahwa pencemar yang dilepas dari sumbernya akan mengalami proses difusi dan adveksi. Proses difusi berlangsung ke arah x , y , dan z (3-D), dan proses adveksi berlangsung searah dengan arah pergerakan fluida (angin). Gabungan kedua proses ini merupakan mekanisme dispersi. Perpindahan pencemar mengikuti arah angin (adveksi) simultan dengan proses difusi ke arah y dan z (keduanya tegak lurus dengan arah perpindahan). Difusi ke arah sumbu x dapat diabaikan karena terlalu kecil dibandingkan dengan adveksinya. Ringkasan hasil verifikasi model terbangun dengan prinsip-prinsip teori yang mendasarinya dapat dilihat pada Gambar 4.56, Gambar 4.57, dan Gambar 4.58.

Pada dispersi ke arah sumbu- x , hasil estimasi konsentrasi pencemar dekat permukaan dari model terbangun, memberikan hasil distribusi konsentrasi yang mengikuti kurva distribusi normal, seperti pada Gambar 4.56. Konsentrasi dekat permukaan akan berubah dengan cepat menuju maksimum dengan bertambahnya jarak penerima dari sumber pencemar. Konsentrasi maksimum dekat permukaan berbanding terbalik dengan pada kecepatan alir (angin). Jarak lokasi konsentrasi maksimum dari sumber menunjukkan hasil sebanding dengan kecepatan alirnya.

Dengan demikian konsentrasi maksimum dekat permukaan akan lebih tinggi dan lebih dekat dengan sumber ketika kecepatan angin rendah, dan akan lebih

kecil dan lebih jauh ketika kecepatan angin lebih tinggi. Untuk sumber pada ketinggian lebih besar, maka titik konsentrasi maksimum dekat permukaan akan lebih jauh dari lokasi sumber. Setelah titik lokasi konsentrasi maksimum dekat permukaan, maka konsentrasi pencemar akan semakin kecil dengan semakin besarnya jarak dari sumber.

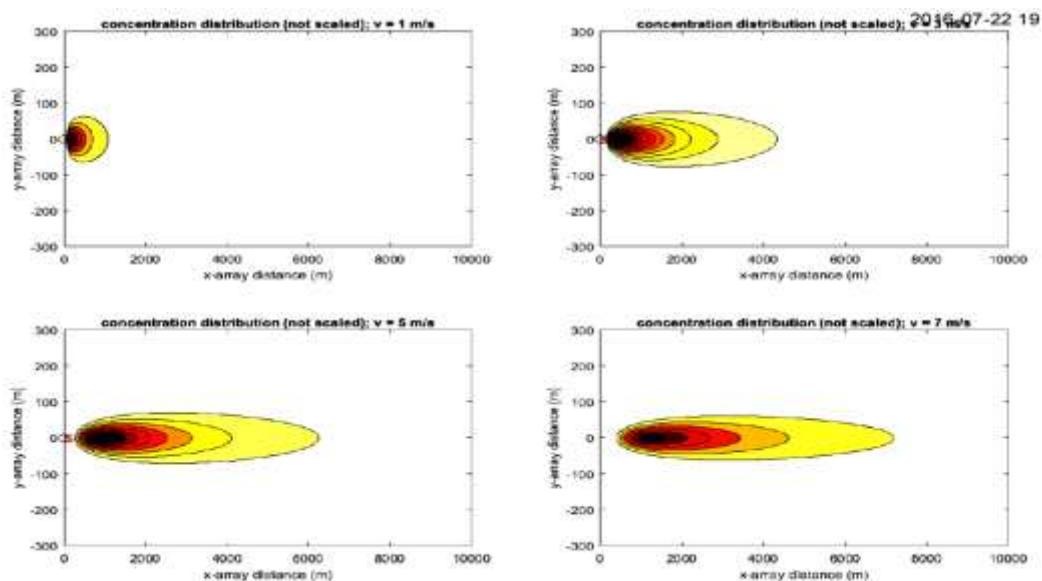


Gambar 4.56. Perubahan pola distribusi konsentrasi pencemar pada penerima di permukaan karena perubahan jarak dan perubahan kecepatan angin (Sumber ; hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab R2013a)

Pada dispersi ke arah sumbu-y, konsentrasi maksimum terjadi pada sepanjang garis tengah aliran seperti tersirat pada Gambar 4.57. Pada potongan melintang sejajar sumbu-y pada pola dispersi tersebut, konsentrasi terbesar pada sepanjang garis $(x,0)$. Semakin jauh jarak titik dari $(x,0)$ maka semakin kecil konsentrasi dekat permukaan hasil estimasi. Perubahan kecepatan angin menunjukkan pengaruh yang kuat pada pola distribusi pencemar di dekat permukaan. Kecepatan angin yang lebih besar menunjukkan pola distribusi pencemar yang lebih merata (lebih luas dengan konsentrasi maksimum juga lebih luas). Namun demikian secara keseluruhan konsentrasi pencemar pada kecepatan angin lebih besar, akan menjadi lebih kecil, seperti dijelaskan sebelumnya (lihat Gambar 4.56).

Respon model terbangun terhadap perubahan arah angin, menunjukkan fleksibilitas keterterimaan model ini untuk aplikasi di lingkungan yang dinamis. Model Gauss, memberikan dasar dispersi dengan asumsi-asumsi kondisi stabilitas atmosfer tertentu, angin homogen dan arahnya ditetapkan searah sumbu-x. Sumber berada di pusat koordinat (0,0) agar perhitungan lebih mudah dan sederhana. Batasan ini menyebabkan model Gauss perlu banyak langkah modifikasi untuk diterapkan dalam estimasi area dengan banyak sumber yang lokasinya berbeda-beda.

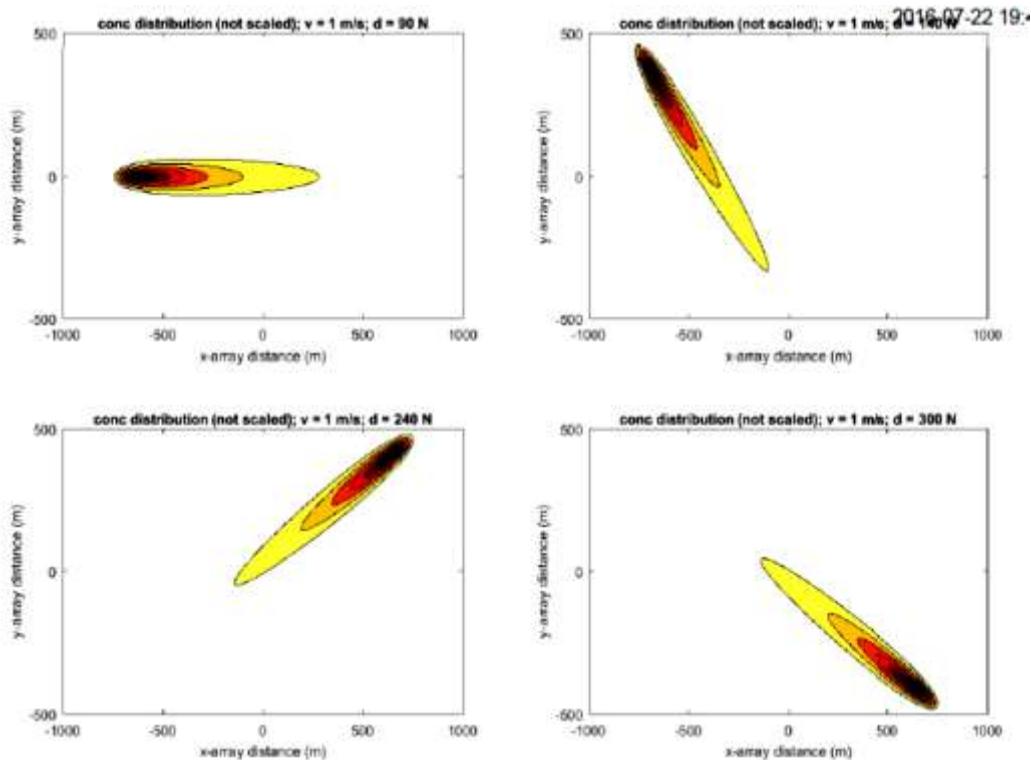
Pada penelitian ini telah dihasilkan model terbangun yang lebih fleksibel terhadap perubahan arah angin dan multi lokasi dari multi sumber pencemar. Perubahan koordinat dan arah angin telah diselesaikan dengan persamaan konversi koordinat (sub bab 4.6.3). Penerapan konversi koordinat ini telah diuji dengan membuat variasi arah angin dari sumber titik maupun garis. Gambar 4.58 menunjukkan hasil estimasi pola dispersi pencemar di dekat permukaan dari sumber titik yang dipindah dan skenario arah angin yang berbeda-beda. Secara ilmiah hasil ini menunjukkan hasil yang konsisten dan sesuai dengan teori dispersi normal.



Gambar 4.57 Perubahan pola distribusi pencemar hasil estimasi model pada kecepatan angin 1, 3, 5, dan 7 m/s. (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab R2013a)

Perubahan arah angin menyebabkan perubahan lokasi penerima dispersi pencemar. Secara umum lokasi penerima dispersi pencemar adalah daerah aliran fluida setelah melewati sumber pencemar (*downstream*). Pencemar dibawa dalam

aliran (adveksi) dan sekaligus mengalami difusi. Model terbangun menunjukkan hasil yang konsisten (tidak ada distorsi hasil) dengan perubahan arah angin dalam semua kuadran. Pada model terbangun ditetapkan arah 0 derajat adalah arah angin menuju utara (N) dan arah 90 derajat adalah ke timur (E). Arah lain mengikuti perubahan sudut arah searah jarum jam dari utara (0) sampai kembali ke utara (360). Dengan demikian, pola dispersi Gambar 4.56, Gambar 4.57, dan Gambar 4.58, menunjukkan model terbangun baik dan sesuai dengan kajian teoritis dispersi pencemar di atmosfer, dengan asumsi kecepatan dan arah angin parsial homogen dalam satu iterasi.



Gambar 4.58 Perubahan arah pola distribusi pencemar hasil estimasi model akibat perubahan arah angin (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab R2013a).

4.7.2. Verifikasi ilmiah terhadap model terbangun dengan pengaruh multi sumber

Verifikasi konsistensi dan keterterimaan model terbangun selanjutnya adalah dengan ujicoba hasil estimasi model dengan adanya multi sumber. Secara prinsip titik-titik lokasi penerima yang dilewati dispersi harus lebih besar jika lebih dekat dengan sumber sampai pada titik konsentrasi maksimumnya. Adanya sumber lain menyebabkan akumulasi konsentrasi dispersi dari semua sumber yang ada.

Dengan demikian konsentrasi akumulasi harus lebih besar dari konsentrasi dispersi sumber tunggal. Pola distribusi hasil dispersi menjadi lebih kompleks sesuai dengan akumulasi dispersi dari masing-masing sumber pencemar.

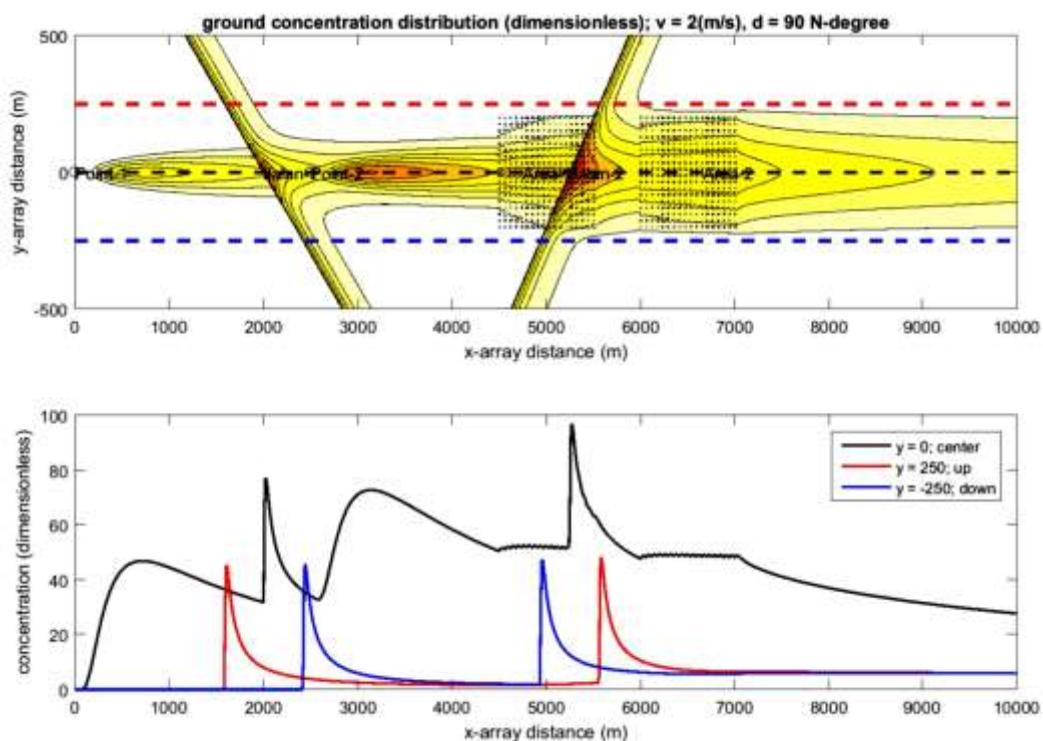
Pengujian estimasi dispersi pencemar dari beberapa sumber dalam satu aliran (satu arah angin) dilakukan dengan menghitung secara simultan dengan komponen pencemar:

- sumber pencemar titik sebanyak 2 dengan beban yang sama pada koordinat Point 1 (0,0) dan Point 2 (0, 2500)
- Sumber garis, dengan asumsi 2 jalan melewati titik-titik (3000,-600) – (1000,600) untuk Jalan 1 dan melewati titik-titik (4500,-600) – (6000,600) untuk Jalan 2. Beban kedua jalan ini diasumsikan sama
- Sumber area dibuat dengan kumpulan banyak sumber titik yang bebannya sama pada luasan yang dibatasi oleh $y = 4500$; $y=5500$; $x=200$; $x = -200$ untuk area 1 dan oleh $y = 6000$; $y = 7000$; $x = 200$; $x = -200$ untuk area 2.
- Estimasi dihitung dengan 2 skenario arah angin. Skenario ini dimaksudkan untuk meyakinkan bahwa model terbangun tidak mengalami kendala dalam menghitung banyak sumber dan arah angin yang tidak searah sumbu-x. Hasil ini sekaligus menguji konsistensi dan keterterimaan hasil estimasi model dengan perubahan arah aliran media pembawa pencemar.

Hasil verifikasi untuk multi sumber ini ditampilkan pada Gambar 4.59 untuk arah angin sesuai sumbu-x (90 N), dan Gambar 4.60 untuk arah angin tidak searah sumbu x (86 N). Penjelasan dari hasil verifikasi tersebut adalah sebagai berikut:

- Hasil dispersi multi sumber dalam arah angin sesuai sumbu x. Arah ini dinyatakan sebagai arah angin ke timur (E) atau 90^0 N, dan semua sumber berada pada pusat aliran (*center line*). Dispersi mengikuti distribusi normal sepanjang aliran. Pencemar dari sumber titik 1 didispersi dengan distribusi normal, demikian juga dengan pencemar dari sumber-sumber berikutnya (jalan 1, titik 2, area 1, jalan 2, dan area 2). Distribusi konsentrasi pencemar dari satu sumber dipengaruhi oleh distribusi dari sumber sebelumnya. Hal ini menghasilkan pola dispersi dengan distribusi yang berbeda dengan pola dispersi dari satu sumber saja. Konsentrasi ambien menjadi lebih besar di

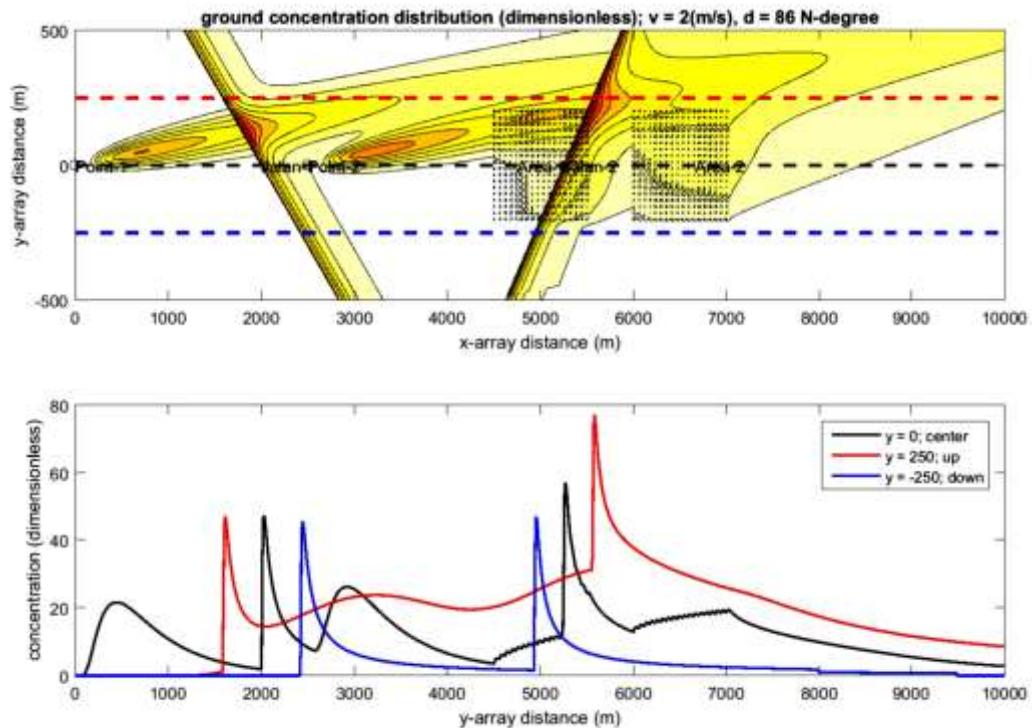
semua titik dispersi dengan semakin banyaknya sumber pencemar yang dilewati aliran, akibat akumulasi dari semua sumber. Pada Gambar 4.61, nampak jelas bahwa pola dispersi setelah melewati Jalan 1 konsentrasi di pusat aliran lebih besar karena pengaruh dispersi sumber titik 1, dan dispersi setelah melewati Jalan 2 menjadi lebih besar karena pengaruh utama dari titik 2 dan area 1 serta pengaruh dari titik 1 dan jalan 1. Dispersi setelah titik 2 dipengaruhi titik 1 dan jalan 1, demikian juga area 1 dipengaruhi titik 1, jalan 1, dan titik 2. Hal ini juga dipertegas, dengan beban yang sama pada tiap jenis sumber, semakin ke kanan nilai maksimum (pada sumber) menjadi lebih tinggi akibat akumulasi dari sumber sebelumnya.



Gambar 4.59 Pola distribusi pencemar hasil estimasi model dan akumulasi akibat adanya beberapa sumber dalam aliran (atas) perubahan konsentrasi dalam pusat aliran dan kiri-kanan aliran(bawah) (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab R2013a).

- Hasil dispersi multi sumber dalam arah angin tidak searah sumbu x (dalam Gambar 4.60). Arah ini dinyatakan sebagai arah angin ke timur agak ke utara (E) atau 86° N, sehingga setiap sumber berada pada satu garis aliran (*center line*). Secara keseluruhan dispersi mengikuti tetap mengikuti distribusi normal sepanjang aliran dengan garis aliran sesuai masing-masing sumber.

Masing-masing dispersi dari sumber dapat saling berakumulasi jika area dispersinya berpotongan (*overlay*). Posisi-posisi sumber yang tidak segaris dalam aliran, juga menyebabkan konsentrasi maksimum lebih rendah dibanding dengan jika sumber-sumber dalam satu garis aliran. Konsentrasi maksimum dari Gambar 4.59 sekitar 95-100 satuan, sedangkan konsentrasi maksimum dari Gambar 4.60 sekitar 75 – 80 satuan. Demikian juga dengan posisi konsentrasi maksimum berubah mengikuti arah angin. Secara keseluruhan dispersi dari sumber-sumber yang tidak segaris dalam aliran menjadi tidak simetris, berbeda dengan kesimetrian pola dispersi dari sumber-sumber yang segaris.



Gambar 4.60. Pola distribusi pencemar hasil estimasi model dan akumulasi akibat adanya beberapa sumber dalam aliran (atas) perubahan konsentrasi dalam pusat aliran dan kiri-kanan aliran (bawah) dengan arah angin tidak searah sumbu-x (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab R2013a).

Hasil yang ditampilkan pada Gambar 4.59 dan Gambar 4.60, memperkuat pembahasan sebelumnya bahwa model terbangun ini cukup *verified*, stabil dan konsisten untuk mengestimasi dispersi mengikuti perubahan sifat aliran (kecepatan dan arah) dan akumulasi multi sumber.

4.7.3. Verifikasi dengan model dispersi Gauss

Untuk mendapatkan nilai simpangan dan tingkat konsistensi hasil dengan teori-teori terdahulu, maka diperlukan verifikasi model yang dihasilkan dalam disertasi dengan model terdahulu yang telah umum digunakan. Karena model yang dihasilkan adalah model matematis, maka verifikasi juga dilakukan dengan model dispersi matematis lain. Pada kajian ini digunakan model dispersi Gauss sebagai verifikator hasil.

Verifikasi dilakukan dengan menerapkan kedua model untuk menghitung dispersi polutan dari sumber titik tunggal dan sumber garis tunggal, dengan parameter analisis disusun sama. Perhitungan dilakukan untuk beberapa titik penerima yang ditentukan, sama untuk kedua model. Titik-titik penerima tersebut ditentukan antara 100 sampai 10000 m dari titik sumber dengan interval 100 m.

Secara prinsip, hasil perhitungan dari kedua model pada titik-titik penerima tersebut akan dibandingkan. Hasil akan dinyatakan semakin baik (*verified*) jika hasil-hasil perhitungan dari kedua model semakin kecil bedanya. Nilai beda ini dapat dinyatakan dalam analisis *error* dan korelasi terhadap keduanya.

Persamaan yang akan digunakan dalam proses verifikasi ini adalah:

1. Persamaan dari model yang dihasilkan dari sub bab 4.6 persamaan 4.127. untuk sumber titik tunggal, proses kinetika reaksi zat pencemar diasumsikan tidak ada (zat konservatif), $k = 0$, $v = u = u_0 \ln(z/z_0)$:

$$C(x, y, z, t) = \frac{q}{4\pi x' \sqrt{D_y D_z}} \exp\left(\frac{-y'^2 v}{4D_y x'}\right) \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x'}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x'}\right) \right) \quad (4.129)$$

2. Persamaan dispersi Gauss untuk sumber titik tunggal, koefisien dispersi ke arah y dan ke arah z mengikuti ketentuan Pasquill dan Turner, 1995:

$$C(x, y, z, t) = \frac{q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right) \left(\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \quad (4.130)$$

Parameter dan variabel dalam verifikasi seperti dicantumkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19. Parameter disusun untuk verifikasi model dispersi dari sumber titik

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai	
Beban pencemar (q)	10	g/s	Kecepatan angin (v)	1, 3, 5, 7, m/s
Tinggi sumber	50	m	Tinggi penerima (z)	1.5 m
Arah angin	90	⁰ N	Stabilitas atmosfer	A, B, C, D,

4.7.3.1. Hasil estimasi menggunakan model dispersi Gauss

Menggunakan parameter-parameter yang tercantum dalam Tabel 4.19. dan diaplikasikan pada persamaan dispersi Gauss (persamaan 4.30), maka diperoleh hasil estimasi konsentrasi ambien di titik-titik penerima yang ditentukan. Hasil estimasi tersebut ditampilkan pada Tabel 4.20 dan Gambar 4.61.

Hal-hal penting yang menjadi acuan dalam verifikasi terhadap model terbangun, sesuai dengan hasil dispersi Gauss (Tabel 4.20 dan Gambar 4.61) dan teori dispersi adalah sebagai berikut:

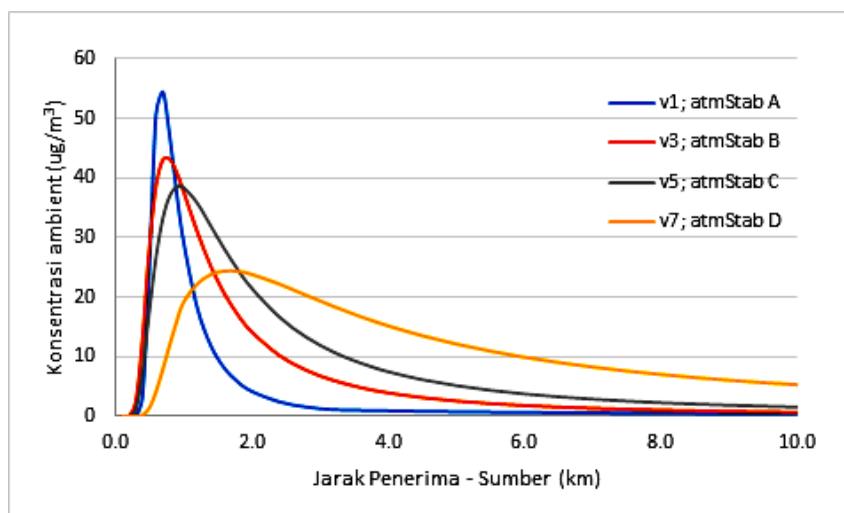
1. Karena ketinggian efektif sumber pencemar, maka konsentrasi *ground* terbesar dihitung setelah jarak tertentu dari sumber. Konsentrasi ambien di *ground* berubah dengan cepat setelah ada jarak dari sumber sampai maksimum dan kembali menurun sampai jarak tak terhingga.
2. Semakin besar kecepatan angin, maka konsentrasi ambien di sekitar sumber menjadi semakin kecil, namun konsentrasi ambien pada penerima yang jauh dari sumber setelah titik maksimum akan semakin besar. Perubahan kecepatan angin menyebabkan perubahan distribusi pencemar. Kecepatan angin yang lebih besar menyebabkan distribusi pencemar lebih merata pada area yang lebih luas.

Tabel 4.20 Hasil estimasi σ_y , σ_z (m) dan konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pencemar di titik penerima menggunakan persamaan Gauss

Jarak (km)	v = 1; stabilitas A			v = 3; stabilitas B			v = 5; stabilitas C			v = 7; stabilitas D		
	σ_y	σ_z	C1	σ_y	σ_z	C3	σ_y	σ_z	C5	σ_y	σ_z	C7
0.1	26.85	13.95	0	19.27	10.60	0	12.46	7.44	0	8.20	4.65	0
0.2	49.97	29.30	0	36.17	20.23	0.01	23.62	14.03	0	15.56	8.50	0
0.3	71.76	47.44	0.02	52.20	30.14	2.31	34.29	20.33	0.98	22.61	12.09	0.00
0.4	92.71	71.16	2.99	67.68	40.00	12.83	44.65	26.45	7.33	29.45	15.27	0.18
0.5	113.04	104.70	24.41	82.75	51.09	28.11	54.77	32.43	17.42	36.15	18.30	1.36
0.6	132.88	153.99	50.67	97.50	62.41	38.67	64.71	38.32	26.70	42.72	21.21	4.10
0.7	152.31	213.37	54.46	111.97	73.91	43.05	74.49	44.12	33.25	49.19	24.03	7.92
0.8	171.40	283.04	46.96	126.21	85.57	43.15	84.14	49.85	36.97	55.57	26.78	12.01
0.9	190.19	363.15	37.60	140.26	97.37	40.97	93.68	55.52	38.46	61.88	29.47	15.81
1.0	208.71	453.85	29.49	154.12	109.30	37.81	103.11	61.14	38.41	68.13	32.09	19.07
1.2	245.07	667.51	18.31	181.38	133.50	31.05	121.72	72.24	35.81	80.44	36.09	22.15
1.4	280.63	924.95	11.88	208.11	158.10	25.20	140.01	83.17	31.96	92.55	39.86	23.76
1.6	315.52	1226.96	8.07	234.39	183.05	20.57	158.04	93.98	28.06	104.49	43.44	24.36
1.8	349.83	1574.23	5.72	260.27	208.30	16.97	175.85	104.67	24.54	116.28	46.86	24.29

Jarak (km)	v = 1; stabilitas A			v = 3; stabilitas B			v = 5; stabilitas C			v = 7; stabilitas D		
	σ_y	σ_z	C1	σ_y	σ_z	C3	σ_y	σ_z	C5	σ_y	σ_z	C7
2.0	383.62	1967.40	4.19	285.80	233.82	14.17	193.45	115.26	21.49	127.94	50.15	23.81
2.4	449.85	2893.61	2.44	335.94	285.59	10.25	228.11	136.17	16.70	150.91	56.40	22.20
2.8	514.54	4009.58	1.54	385.02	338.22	7.72	262.17	156.79	13.27	173.48	62.29	20.30
3.2	577.91	5000.00	1.10	433.21	391.58	6.00	295.71	177.16	10.76	195.71	67.71	18.41
3.6	640.13	5000.00	0.99	480.61	445.59	4.80	328.79	197.31	8.89	217.64	72.71	16.69
4.0	701.34	5000.00	0.91	527.31	500.20	3.92	361.47	217.27	7.47	239.31	77.49	15.16
4.5	776.58	5000.00	0.82	584.82	569.19	3.13	401.80	241.99	6.13	266.06	83.21	13.51
5.0	850.57	5000.00	0.75	641.47	638.94	2.55	441.64	266.47	5.12	292.47	88.69	12.10
5.5	923.42	5000.00	0.69	697.34	709.37	2.12	481.01	290.74	4.35	318.59	93.95	10.91
6.0	995.25	5000.00	0.64	752.50	780.42	1.79	519.98	314.82	3.74	344.44	99.03	9.89
6.5	1066.14	5000.00	0.60	807.01	852.05	1.53	558.57	338.74	3.25	370.04	103.94	9.01
7.0	1136.17	5000.00	0.56	860.93	924.22	1.32	596.81	362.49	2.86	395.41	108.71	8.25
7.5	1205.40	5000.00	0.53	914.30	996.90	1.16	634.73	386.11	2.53	420.57	113.34	7.58
8.0	1273.88	5000.00	0.50	967.15	1070.04	1.02	672.34	409.58	2.26	445.53	117.85	7.00
8.5	1341.67	5000.00	0.47	1019.52	1143.63	0.91	709.67	432.94	2.03	470.30	122.25	6.49
9.0	1408.81	5000.00	0.45	1071.44	1217.64	0.81	746.74	456.17	1.83	494.90	126.56	6.04
9.5	1475.32	5000.00	0.43	1122.93	1292.05	0.73	783.55	479.30	1.67	519.34	130.76	5.63
10.0	1541.25	5000.00	0.41	1174.01	1366.85	0.66	820.13	502.32	1.52	543.62	134.89	5.27

Sumber: Hasil perhitungan menggunakan excel office 2013

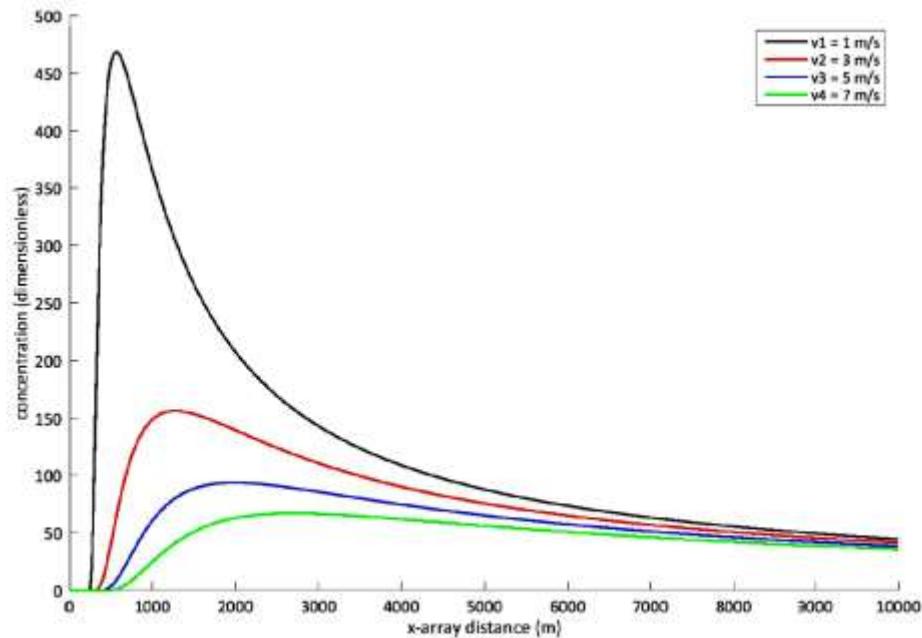


Gambar 4.61 Pola Perubahan konsentrasi dengan jarak dispersi, kecepatan angin dan stabilitas atmosfer menurut model dispersi Gauss (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Excel 2013)

4.7.3.2. Hasil estimasi menggunakan model dispersi terbangun

Menggunakan persamaan 4.127 dengan $k = 0$ atau persamaan 4.129 dan parameter-parameter yang sama, seperti pada point 4.7.3. Tabel 4.21, model terbangun digunakan untuk mengestimasi konsentrasi ambient pada titik-titik

penerima seperti pada penerapan persamaan Gauss. Hasil estimasi model terbangun untuk sumber titik tunggal dinyatakan dalam Gambar 4.62.



Gambar 4.62. Pola Perubahan konsentrasi dengan jarak dispersi, kecepatan angin menurut model awal dispersi terbangun (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar menggunakan Matlab 2013a)

Membandingkan pola pada Gambar 4.61 (hasil estimasi model Gauss) dengan pola pada Gambar 4.62 (hasil estimasi model awal), nampak ada persamaan dan perbedaan yang sangat jelas. Secara umum pola dispersi secara individual mirip mengikuti sebaran normal pada kedua model. Namun, hasil estimasi model awal jauh lebih besar dibanding dengan hasil estimasi model Gauss hampir pada semua titik. Hal ini menunjukkan bahwa model awal yang dikembangkan perlu dikalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan menambahkan konstanta tertentu sehingga hasil estimasi model terbangun dapat lebih dekat dengan model Gauss.

Rekayasa matematik dilakukan untuk mendapatkan faktor kalibrasi model. Faktor kalibrasi ini harus konsisten terhadap keempat kondisi yang diestimasi. Menggunakan analisis grafis diperoleh bahwa perbedaan kedua model sangat dipengaruhi oleh perubahan kecepatan angin dan perubahan jarak dispersi. Nampak dari kedua pola (estimasi model terbangun dan estimasi model Gauss) nilai angin yang semakin kecil menghasilkan perbedaan hasil semakin besar, dan jarak dispersi semakin besar menghasilkan perbedaan hasil semakin besar pula. Dengan demikian

maka faktor kalibrasi (fk) dapat dinyatakan berbanding terbalik dengan x dan berbanding lurus dengan v , sehingga:

$$fk \approx \frac{v^n}{x^m}; \Rightarrow fk = k \frac{v^n}{x^m}$$

Nilai eksponen n dan m diberikan untuk menyatakan bahwa korelasi k dengan v dan x belum tentu linier. Menggunakan metode *try and error*, dan regresi data hasil dari kedua model, beberapa nilai k , n , dan m diuji pada semua kondisi v dan x . Hasil dari metode ini adalah diperolehnya nilai fk yang cukup konsisten memenuhi semua kondisi adalah:

$$fk = \frac{(39.2 - 3.25 v)v^2}{x} \quad (4.131)$$

Nilai fk ini kemudian dimasukkan ke persamaan 4.129, menghasilkan persamaan model terkalibrasi dengan fk , sebagai berikut:

$$C(x, y, z,) = fk \frac{q}{4\pi x' \sqrt{D_y D_z}} \exp\left(\frac{-y'^2 v}{4D_y x'}\right) \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x'}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x'}\right) \right)$$

$$C(x, y, z,) = \left(\frac{(39.2 - 3.25 v)v^2}{x'} \right) \frac{q}{4\pi x' \sqrt{D_y D_z}} \exp\left(\frac{-y'^2 v}{4D_y x'}\right) \left(\exp\left(\frac{-(z-H)^2 v}{4D_z x'}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2 v}{4D_z x'}\right) \right) \quad (4.132)$$

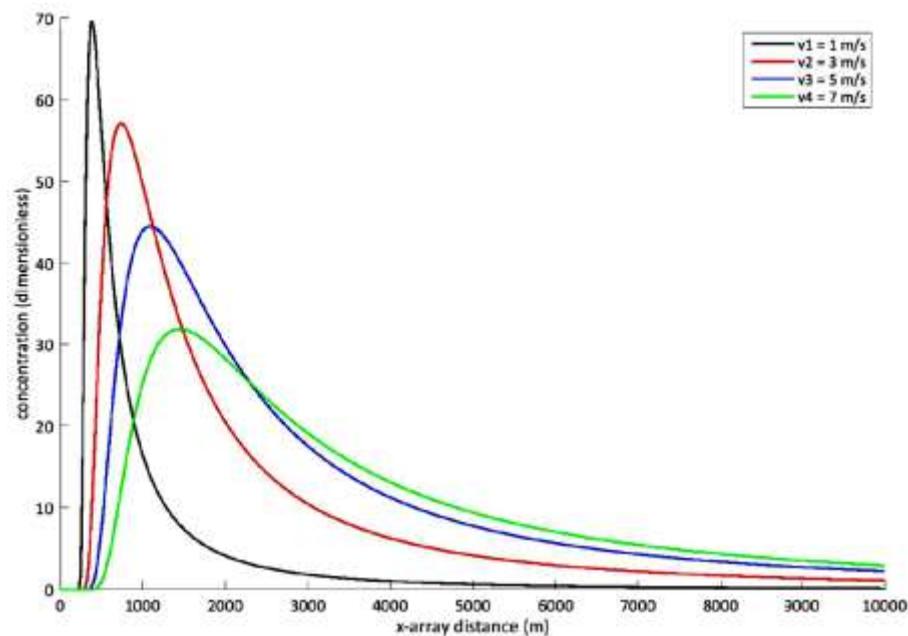
Menggunakan parameter-parameter yang sama, seperti pada pont 4.7.3.1. model terbangun terkalibrasi (persamaan 4.132) digunakan untuk mengestimasi konsentrasi ambient pada titik-titik penerima seperti pada penerapan kedua model sebelumnya. Hasil estimasi model terbangun untuk sumber titik tunggal dinyatakan dalam Tabel 4.21 dan Gambar 4.63. Dalam hal ini perhitungan menggunakan asumsi pencemarnya bersifat konservatif, tidak ada reaksi yang dianggap berpengaruh pada konsentrasi hasil dispersi, mengikuti asumsi Model Gauss. Hasil model terkalibrasi ini kemudian dibandingkan dengan hasil estimasi model Gauss untuk ditentukan korelasi dan simpangan yang terhitung. Analisis korelasi dan simpangan dinyatakan pada sub bab 4.7.3.3.

Tabel 4.21 Hasil estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) menggunakan persamaan model terbangun ($C_n = C$ pada kecepatan angin n m/s)

Jarak (km)	Konsentrasi Ambient ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Jarak (km)	Konsentrasi Ambient ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	C1	C3	C5	C7		C1	C3	C5	C7
0.0	E-10	E-39	E-67	E-96	2.8	3.86	18.46	26.04	24.06

0.2	E-6	E-18	E-30	E-35	3.2	3.19	15.87	23.29	22.38
0.3	E-2	E-4	E-5	E-8	3.6	2.28	12.05	18.76	19.13
0.4	0.01	0.00	0.00	E-3	4.0	1.71	9.43	15.33	16.30
0.5	64.12	13.38	0.86	0.04	4.5	1.33	7.58	12.71	13.95
0.6	51.54	34.55	6.95	0.93	5.0	1.06	6.21	10.68	12.02
0.7	39.01	47.03	16.88	4.01	5.5	0.87	5.18	9.09	10.44
0.8	29.84	51.22	26.08	8.75	6.0	0.69	4.22	7.55	8.84
0.9	23.34	50.72	32.63	13.80	6.5	0.57	3.50	6.36	7.57
1.0	18.66	48.03	36.53	18.25	7.0	0.47	2.95	5.43	6.55
1.2	15.23	44.49	38.38	21.73	7.5	0.40	2.52	4.69	5.71
1.4	12.65	40.77	38.80	24.22	8.0	0.34	2.18	4.09	5.03
1.6	10.66	37.19	38.28	25.84	8.5	0.30	1.90	3.59	4.45
1.8	7.85	30.86	35.75	27.13	9.0	0.26	1.67	3.19	3.97
2.0	6.02	25.75	32.46	26.80	9.5	0.23	1.48	2.84	3.57
2.4	4.76	21.69	29.13	25.62	10.0	0.20	1.32	2.55	3.22

Sumber : Hasil perhitungan digenerasi dengan Matlab 2013a



Gambar 4.63. Pola Perubahan konsentrasi dengan jarak dispersi, kecepatan angin menurut model dispersi terbangun terkalibrasi dengan fk (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar menggunakan Matlab 2013a)

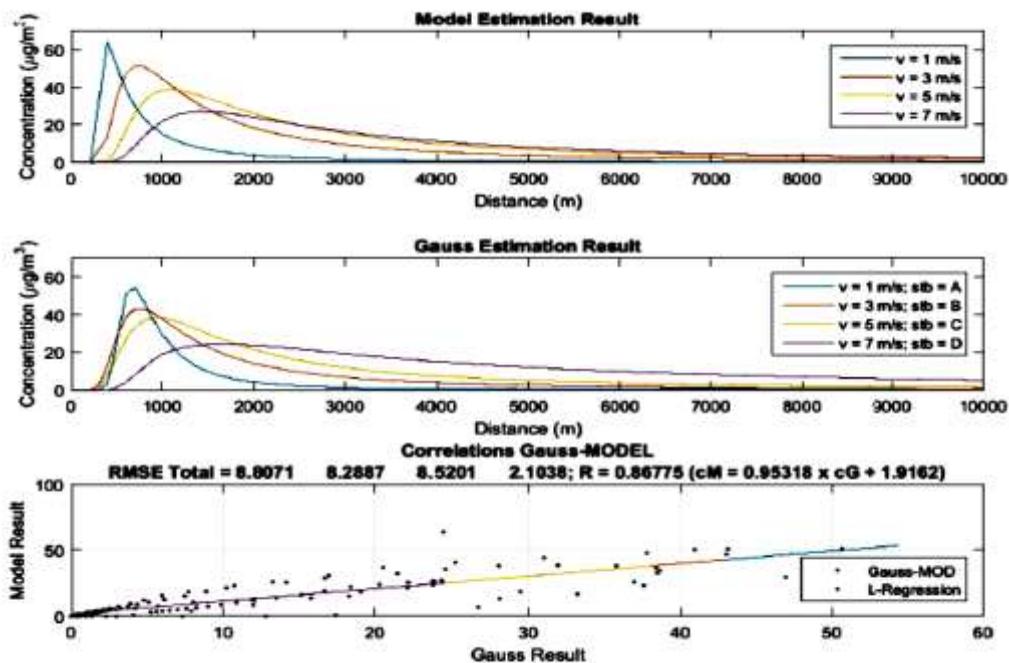
Hal-hal penting yang dalam verifikasi model terbangun, sesuai dengan hasil dispersi model terbangun (Tabel 4.21 dan Gambar 4.63), model Gauss (Tabel 4.20 dan Gambar 4.61), dan teori dispersi adalah sebagai berikut:

1. Pola dispersi yang dihasilkan mirip dengan pola dispersi hasil estimasi Gauss, dengan beberapa nilai bergeser lebih dekat dengan sumber pencemar terutama pada kecepatan angin rendah.
 2. Semakin besar kecepatan angin, maka pola dispersi yang dihasilkan oleh model terbangun mendekati pola dispersi yang dihasilkan model dispersi Gauss.
 3. Stabilitas atmosfer, secara umum sudah terwakili dalam persamaan model terbangun, dalam koefisien difusi (D_y dan D_z) dan koreksi kecepatan yang masuk dalam aplikasi koefisien difusi. Namun demikian masih diperlukan penelitian lebih dalam konsistensi dan stabilitas model terbangun ini untuk stabilitas E dan F atau kondisi lain.
- 4.7.3.3. Hasil estimasi tingkat *error* dan korelasi hasil perhitungan model dispersi Gauss dengan model dispersi terbangun

Analisis lebih lanjut dalam proses verifikasi hasil dispersi model terkalibrasi dibandingkan dengan hasil dispersi Gauss dapat dilihat pada Gambar

4.64. Resume hal tersebut adalah:

1. Aplikasi parameter yang sama menghasilkan hasil estimasi model terbangun sedikit lebih besar dibandingkan dengan hasil estimasi dispersi Gauss. Pada analisis regresi diperoleh hubungan $cM = 0,953 cG + 1.9$. Hubungan dari regresi linear ini menunjukkan bahwa konsentrasi yang dihasilkan model terbangun sekitar 95,3 % dari besar konsentrasi yang dihasilkan oleh dispersi Gauss .
2. Pola dispersi model terbangun dengan pola dispersi Gauss cukup mirip. Korelasi yang dihasilkan dari kedua model ini sebesar $R = 0,86775$.
3. Nilai error pada korelasi model dispersi terbangun dengan model dispersi Gauss dinyatakan dalam RMSE (root mean square error), dalam rentang estimasi $0 - 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ adalah $2,104 - 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atau rata-rata sekitar 3,2 % sampai 13,5 %. Nilai error terbesar pada estimasi dengan kecepatan angin rendah.
4. Nilai konsentrasi tertinggi pada penerima di permukaan tanah, menunjukkan tempat yang berbeda sekitar 200 - 300 m pada kecepatan angin rendah. Semakin besar kecepatan angin perbedaan ini semakin kecil.



Gambar 4.64 Pola distribusi pencemar hasil estimasi model (atas), hasil estimasi Gauss (tengah) dan korelasi serta nilai *error* (RMSE) model terbangun dengan Gauss (bawah) (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab 2013a)

Membandingkan hasil pola dispersi dari kedua model di atas maka dapat dianalisis hal-hal berikut:

- Model terbangun memberikan hasil verifikasi yang baik, stabil, dan konsisten sesuai dengan prinsip teori dispersi yang mendasarinya, baik untuk aliran searah sumbu-x maupun dalam arah lain ($0 - 360^0$ N) dan kecepatan aliran (angin) yang bervariasi.
- Model terbangun memberikan hasil verifikasi yang baik dan konsisten dalam penerapannya untuk estimasi dispersi dengan multi sumber dan perubahan arah aliran (kecepatan dan arah aliran angin).
- Dibandingkan dengan model matematik Gauss dengan konstanta dispersi empiris, model terbangun dengan konstanta difusi matematik dapat memberikan hasil yang cukup dekat, dengan korelasi $R = 0,868$ dan RMSE sekitar 2 – 8,8 satuan, pada pengukuran 20 – 60 satuan konsentrasi, atau dengan kesalahan sekitar 3,2 sampai 13,5 %.

- Model terbangun secara teoritis memberikan hasil yang baik untuk mengestimasi lokasi dan besar konsentrasi akibat dispersi baik dari satu jenis sumber maupun multi jenis sumber dengan lokasi yang berbeda, terutama untuk pencemar konservatif (dengan asumsi tidak ada reaksi kimia yang mempengaruhi konsentrasi dispersi). Dengan demikian, model terbangun ini akan cukup baik jika diterapkan untuk pencemar konservatif atau pencemar dengan *lifetime* yang tinggi (stabil di atmosfer).
- Faktor kalibrasi (*fk*) yang dinyatakan pada persamaan 4.131 dapat berlaku umum pada kecepatan angin 1 – 7 m/s untuk model terbangun terkalibrasi (persamaan 4.132), memberikan hasil yang setara dan konsisten dengan stabilitas Pasquill tipe A, B, C, D pada model dispersi Gauss. Dengan demikian model terbangun terkalibrasi dapat berlaku lebih baik dengan tidak menggunakan koefisien dispersi yang tergantung pada stabilitas Pasquill. Faktor kalibrasi ini merupakan konstanta baru yang diperoleh dari pengembangan model ini yang dapat berlaku umum untuk model dispersi seperti pada persamaan 4.132. Untuk selanjutnya, model terkalibrasi (persamaan 4.132) digunakan dalam penelitian ini.

4.8. Estimasi jumlah grid optimum dalam iterasi

Perhitungan matematis dalam model terbangun menggunakan sistem numerik dengan pembagian grid sebagai penentu ketelitian hasil perhitungan. Setiap grid memuat satu seri iterasi perhitungan dari semua sumber. Dalam model ini jumlah iterasi (perhitungan) dalam setiap grid adalah sesuai akumulasi dari:

- Jumlah sumber titik (2), jumlah segmen lurus sumber garis jalan (122), dan jumlah segmen sumber area ($156 \times 9 \times 9 = 12636$)
- Jumlah data yang akan dihasilkan dalam rencana time series (48 data per hari).

Dengan demikian jumlah beban iterasi tiap satu grid untuk menghasilkan 48 data dalam 1 hari sebanyak $(2+122+12.636) \times 48 = 612.480$ iterasi.

Sebagai contoh jika ditetapkan grid perhitungan 10 (jumlah grid $10 \times 10 = 100$), maka jumlah iterasi yang digunakan dalam menjalankan model ini adalah 61.248.000 iterasi; sedangkan digunakan grid 20 ($20 \times 20 = 400$), maka diperlukan

iterasi $(400/100) \times 61,248 \text{ juta} = 244,992 \text{ juta}$ iterasi. Jumlah iterasi ini akan menyebabkan model ini semakin berat dan membutuhkan waktu semakin lama jika digunakan mengestimasi dengan grid yang semakin besar.

Secara prinsip semakin banyak grid yang digunakan maka hasil perhitungan semakin baik (teliti dan spesifik). Namun semakin banyak waktu yang dibutuhkan menyebabkan perhitungan semakin tidak efektif. Dengan demikian diperlukan analisis untuk menentukan jumlah grid minimal yang dinyatakan cukup untuk menghasilkan perhitungan yang efisien (hasil dengan ketelitian baik (optimal) dan waktu yang lebih efektif singkat).

Dalam penentuan jumlah grid optimum ini digunakan tiga kriteria yaitu resolusi pola dispersi (grafik pola sebaran pencemar), ketelitian hasil perhitungan (kestabilan hasil estimasi terhadap nilai referensi), dan waktu yang diperlukan untuk *running* total.

4.8.1. Penentuan jumlah grid untuk mendapatkan resolusi yang baik pada pola sebaran dispersi

Prinsip dari perhitungan ini adalah bahwa dalam area 1 grid nilai konsentrasi adalah sama. Grid yang lebih kecil akan mewakili luas area yang lebih besar seperti tercantum pada Tabel 4.24, dan sebaliknya. Dengan demikian pada grid yang rendah perubahan nilai konsentrasi menjadi tidak sensitif terhadap perubahan posisi, kecuali jika posisi telah berpindah ke grid lain. Semakin besar grid yang digunakan, maka area perhitungan parsialnya semakin kecil, sehingga perubahan nilai konsentrasi hasil estimasi menjadi lebih sensitif terhadap perubahan posisi.

Pada Gambar 4.65 ditampilkan hasil estimasi model yang dijalankan dengan grid yang bervariasi. Nampak bahwa pada grid paling kecil (10 x 10) pola dispersi hasil estimasi tercampur dari semua sumber. Secara keseluruhan hanya dapat digunakan untuk melihat lokasi dengan konsentrasi tinggi dan rendah secara kasar. Semakin besar grid yang ditetapkan berangsur-angsur nampak pola distribusi yang menunjukkan adanya sumber dan degradasi konsentrasi yang lebih jelas dan lebih teliti. Pada penelitian ini, jumlah grid 200 atau 300 sudah cukup memberikan degradasi pola dispersi yang cukup untuk menunjukkan adanya sumber-sumber

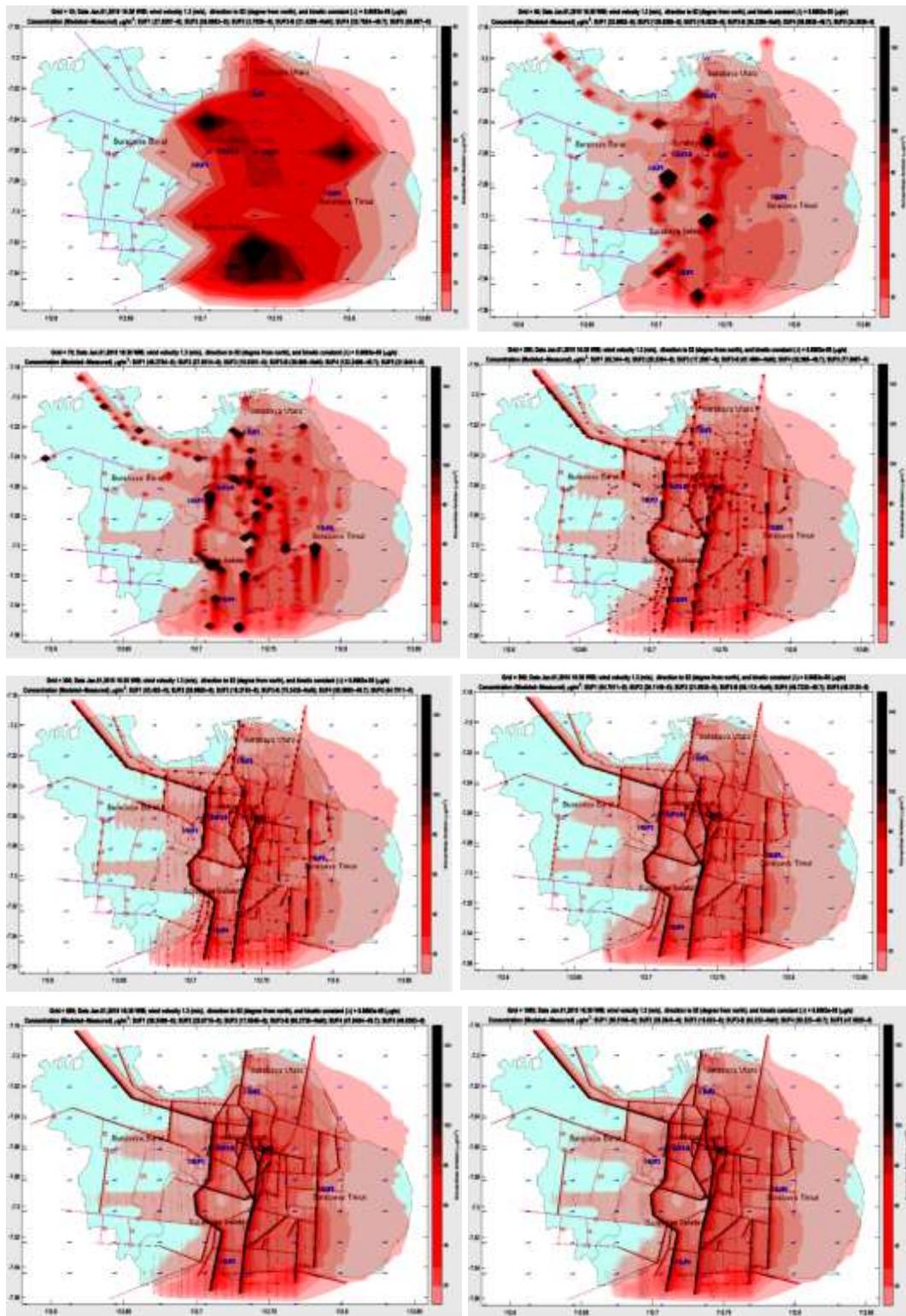
yang spesifik. Semakin besar grid hasil dispersi ini semakin baik dan jelas membedakan perubahan konsentrasi dengan perubahan posisi. Semakin besar grid yang digunakan, sensitifitas hasil perhitungan semakin baik terhadap perubahan koordinat posisi penerima.

Secara visual, grid lebih besar dari 300 tidak banyak memberikan perubahan pola dispersi dengan nyata. Dengan demikian, perhitungan menggunakan grid 300 atau lebih cukup memberikan hasil yang baik dalam menjalankan model ini untuk estimasi pencemar di kota Surabaya. Karena grid ini berhubungan juga dengan distribusi sumber pencemar, maka harus ditentukan grid optimal yang diperlukan jika diterapkan pada wilayah dengan distribusi sumber yang berbeda.

4.8.2. Penentuan jumlah grid untuk mendapatkan nilai yang stabil pada hasil estimasi yang baik pada pola sebaran dispersi (ketelitian hasil perhitungan)

Perubahan resolusi pola dispersi dihasilkan dari nilai-nilai yang dihasilkan dari hasil estimasi dengan menjalankan model. Dengan demikian perubahan pola yang tergambar pada grafik dispersi merepresentasikan nilai-nilai estimasi konsentrasi pada koordinat yang sesuai. Nampak pada Gambar 4.65, pada koordinat lokasi yang sama penunjukan konsentrasi dapat berbeda karena perbedaan grid. Dengan demikian diperlukan analisis grid minimal yang diperlukan sehingga nilai konsentrasi estimasi cukup stabil, artinya cukup dekat dengan nilai referensinya, dan tidak banyak berubah jika grid dinaikkan.

Untuk keperluan tersebut dilakukan analisis terhadap perubahan nilai estimasi model karena perubahan grid dibandingkan dengan nilai referensi. Pada kasus ini, nilai referensi yang digunakan adalah data pengukuran pada salah satu titik pantau pada waktu yang sama dengan skenario model. Data dan skenario tersebut adalah:



Gambar 4.65 Resolusi pola distribusi pencemar hasil estimasi model pada variasi grid 10, 40, 70, 200, 300, 500, 800, dan 1000 (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab 2013a)

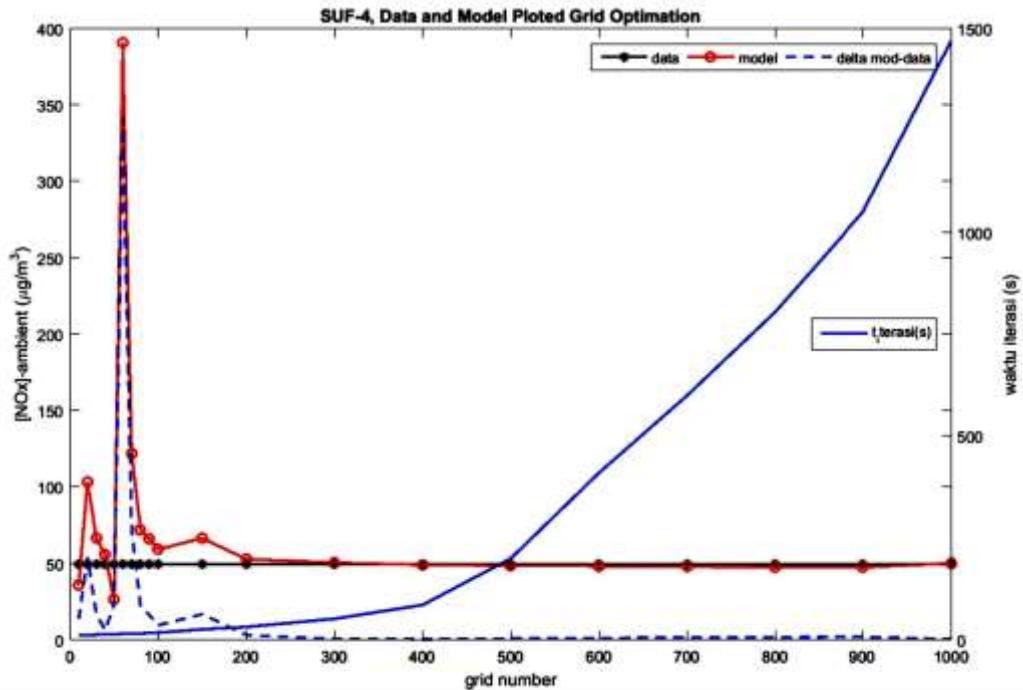
- Data referensi adalah data rekaman NO₂ di SUF4 pada tanggal 1 Januari 2010 pukul 16.30 WIB
- Model terbangun dijalankan dengan variasi grid seperti pada Tabel 4.24, dengan data kecepatan angin, arah angin, dan GRAD sesuai dengan yang terekam pada SUF4 pada tanggal 1 Januari 2010 pukul 16.30 WIB

Hasil resume dari penentuan grid, luas area setiap grid, data konsentrasi NO₂ di SUF4, dan hasil estimasi model pada setiap grid ditampilkan pada Tabel 4.22 dan Gambar 4.66. Nampak bahwa pada grid rendah (kurang dari 200) nilai estimasi tidak stabil dan berfluktuasi dengan jarak yang cukup besar dari nilai referensi. Hasil model menjadi sangat dekat dengan nilai referensi pada perhitungan dengan grid 300 atau lebih.

Hasil perhitungan secara umum telah stabil dengan grid 300 atau lebih. Hal ini berarti untuk kondisi distribusi pencemar seperti di kota Surabaya perhitungan dengan grid area 100 m x 50 m sudah mencukupi untuk mendapatkan data yang stabil dan konsisten. Semakin kecil grid area yang digunakan (grid > 300) maka hasil perhitungan tidak memberikan hasil yang secara perhitungan berbeda dengan grid 300.

Tabel 4.22 Perubahan nilai estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) terhadap data SUF4 dan waktu iterasi model dengan variasi grid

GRID (n x n)	Real size (m)	SUF4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MOD4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	t_iterasi (s)	GRID (n x n)	Real size (m)	SUF4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MOD4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	t_iterasi (s)
10	2820x1680	49.70	35.76	12	150	188x112	49.70	66.61	26
20	1410x840	49.70	103.66	12	200	141x84	49.70	52.99	32
30	940x565	49.70	66.71	13	300	94x56	49.70	50.60	52
40	705x420	49.70	56.08	14	400	71x42	49.70	49.23	86
50	564x336	49.70	26.44	14	500	56x34	49.70	48.72	200
60	470x280	49.70	391.03	15	600	47x28	49.70	48.40	410
70	403x240	49.70	122.24	15	700	40x24	49.70	47.99	600
80	353x210	49.70	72.31	16	800	35x21	49.70	47.85	805
90	313x187	49.70	66.19	17	900	31x19	49.70	47.61	1050
100	282x168	49.70	59.31	18	1000	28x17	49.70	50.22	1470



Gambar 4.66. Nilai estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) terhadap data SUF4 dan waktu iterasi model dengan variasi grid (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab 2013a)

4.8.3. Penentuan jumlah grid untuk mendapatkan waktu perhitungan yang efisien pada hasil estimasi yang baik pada pola sebaran dispersi (ketelitian hasil perhitungan)

Secara perhitungan waktu yang diperlukan untuk menjalankan model karena perubahan grid adalah sebanding dengan jumlah grid yang dihitung. Asumsi yang digunakan adalah waktu setiap iterasi model adalah konstan. Dugaan waktu untuk menjalankan model dapat didekati dengan:

$$t_{i-2} = t_{i-1} \frac{grid_2^2}{grid_1^2}$$

Perubahan waktu untuk menjalankan model ini akan sebanding dengan kuadrat grid yang digunakan.

Hasil pada Tabel 4.22 dan Gambar 4.66 juga menunjukkan waktu yang diperlukan untuk menjalankan model pada setiap grid yang digunakan. Nampak bahwa perubahan waktu yang diperlukan ini tidak linear dengan jumlah grid, tetapi lebih dekat dengan kurva kuadratik. Artinya, semakin banyak grid yang digunakan waktu yang diperlukan menjadi lebih besar secara kuadratik. Dengan demikian

diperlukan batasan waktu yang dianggap layak untuk efisiensi model yang digunakan.

Pada penelitian ini sesuai dengan sifat data referensinya maka waktu yang dianggap efisien adalah kurang dari 15 menit (< 900 s). Ini didasarkan pada data skunder yang dijadikan referensi mempunyai interval 30 menit, sehingga model dengan waktu maksimum separo dari interval data dianggap memadai untukantisipasi masalah dalam perhitungan yang mungkin terjadi. Sehingga jumlah grid yang membutuhkan waktu menjalankan model lebih dari 900 detik akan dinyatakan tidak efisien. Dari Gambar 64 dapat dianalisis dengan maksimum grid 800 membutuhkan waktu maksimum 900 detik. Sehingga model ini cukup efisien dengan pembatasan maksimum grid adalah 800.

Dari analisis-analisis yang dilakukan di atas, maka penentuan jumlah grid optimum sesuai dengan tiga kriteria yang ditentukan adalah:

- resolusi pola dispersi (grafik pola sebaran pencemar): grid minimal 300
- ketelitian hasil perhitungan (kestabilan hasil estimasi terhadap nilai referen): grid minimal 300
- waktu yang diperlukan untuk running total: grid maksimal 800

Dengan demikian maka untuk mendapatkan hasil yang efektif maka program ini harus dijalankan pada grid 300 – 800. Rentang ini telah memberikan resolusi yang memadai, nilai estimasi yang stabil, dan waktu yang efisien untuk menjalankan program. Jika resolusi dispersi tidak terlalu diperlukan, maka grid minimal 300 merupakan batasan yang cukup untuk menjalankan program ini dengan hasil yang secara ilmiah cukup baik. Analisis lebih lanjut dalam penelitian ini digunakan grid 300 dalam perhitungan atau jika diperlukan resolusi pola dispersi yang lebih tinggi dapat digunakan grid > 300 .

4.9. Estimasi simpangan model terhadap rekaman data pengukuran

Dalam kenyataan di wilayah urban seperti Kota Surabaya, dengan banyak sumber pencemar dan penggunaan bahan bakar fosil, dihasilkan juga pencemar yang tidak konservatif. Konsentrasi pencemar ini selain dipengaruhi beban dari sumber dan dispersi, juga dipengaruhi oleh reaksi kimia atau fotokimia yang terjadi. Contoh pencemar ini adalah NO_2 dan O_3 . Memperhatikan hal tersebut, maka verifikasi

model ini perlu dilanjutkan terutama dengan memasukkan kinetika reaksi dalam model dispersi. Proses verifikasi ini juga sekaligus menganalisis penerapan model ini untuk mengestimasi besar konsentrasi hasil dispersi dengan menambahkan satu variabel yaitu waktu. Dengan demikian proses verifikasi ini juga untuk melihat kemampuan model terbangun dalam menghasilkan data estimasi *time series*.

4.9.1. Penentuan korelasi model dengan data pengukuran

Korelasi ini diperoleh dengan membandingkan data estimasi *time series* dengan data rekaman hasil pengukuran Kota Surabaya. Untuk keperluan tersebut maka disusun batasan dan parameter uji sebagai berikut:

- Data pembanding adalah data rekaman di SUF-4, dalam interval waktu 30 menit
- Parameter uji adalah pencemaran non konservatif (NO_2), GRAD, arah dan kecepatan angin
- Konstanta kinetika yang digunakan adalah hasil dari sub bab 4.4, $\text{grid} = 300$.
- Sumber pencemar ditentukan dengan adanya sumber titik, sumber garis, dan sumber area di sekitar SUF-4.

Data pembanding yang terekam di SUF 4 pada tanggal 1 Januari 2010 diberikan pada Tabel 4.25 dan dinyatakan dalam profil Gambar 4.65. Semua data berasal dari BLH Surabaya dengan ijin akses tahun 2015. Beban pencemaran pada sumber dikutip dari penelitian-penelitian terdahulu yang dihasilkan oleh Laboratorium Pengendalian Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim (LPPUPI) ITS Surabaya dalam kurun waktu 2010 – 2015 atau referensi lain yang relevan. Data-data tersebut dan sumber referensi ditampilkan dalam Tabel 4.24.

Sebagian contoh hasil estimasi dari model terbangun yang dijalankan dengan data yang relevan dan $\text{grid} = 300$, digambarkan dalam pola dispersi dalam Gambar 4.67. Nampak pada gambar tersebut lokasi dengan konsentrasi estimasi berubah mengikuti arah dispersi dan posisi sumber. Sehingga dengan distribusi sumber yang tetap, besar konsentrasi akibat dispersi bisa bervariasi karena kecepatan dan arah angin pembawanya.

Titik-titik pemantau udara kota Surabaya dalam Gambar 4.67, dinyatakan dengan SUF1, SUF2, SUF3, SUF3B, SUF4, dan SUF5, sesuai dengan data lokasi

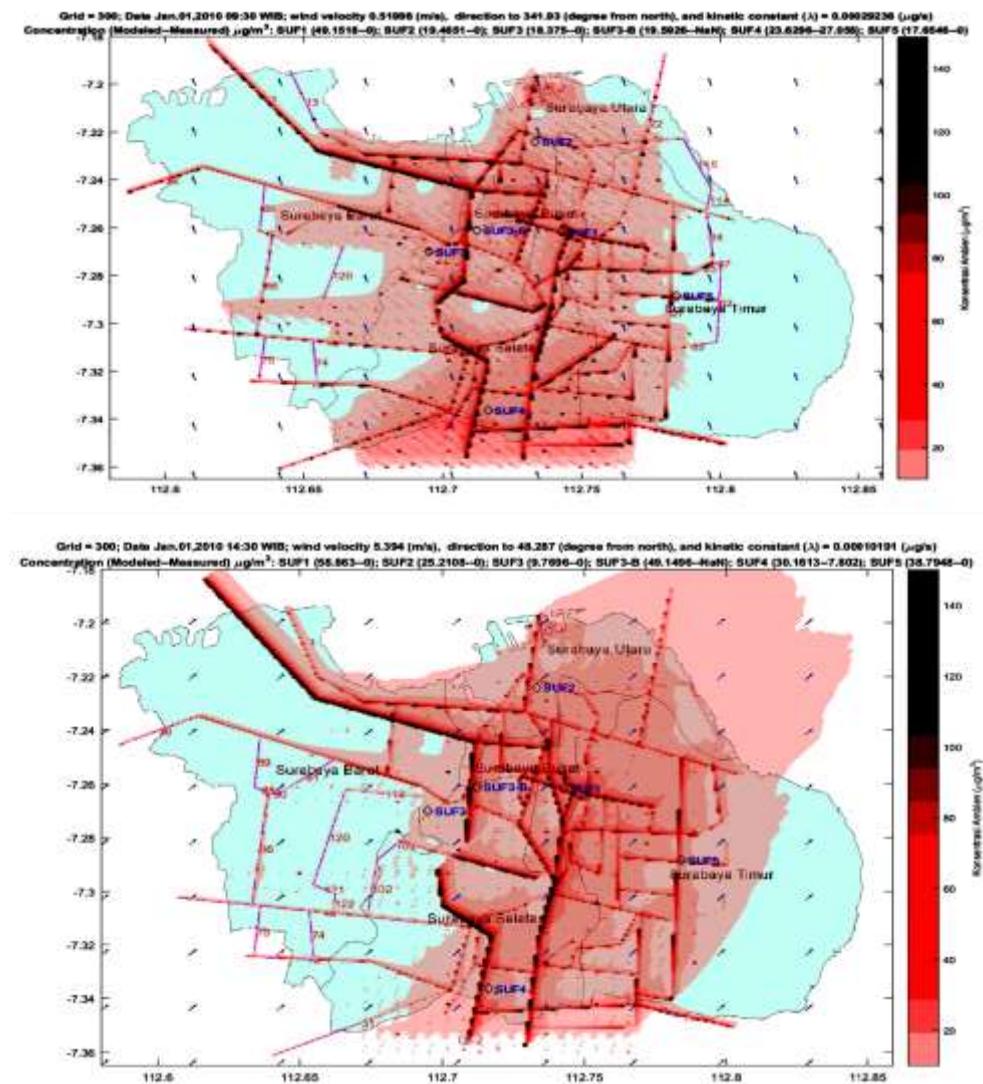
riilnya. Untuk keperluan membandingkan hasil model dengan data SUF, maka titik estimasi model dibuat sama dengan koordinat riil SUF, meskipun titik tepatnya mengikuti grid yang digunakan. Dengan demikian nilai konsentrasi hasil estimasi model diharapkan dapat menggambarkan konsentrasi yang direkam alat pemantau udara di lokasi SUF yang relevan.

Tabel 4.23 Data kecepatan dan arah angin, GRAD, serta konsentrasi pencemar NO₂ yang terekam pada SUF-4 (Sumber: BLH Kota Surabaya, 2015)

Date, time	GRAD	Angin (0 N, m/s)		NO ₂	Date, time	GRAD	Angin (0 N, m/s)		NO ₂
	W/m ²	Arah	Kec.	(µg/m ³)		W/m ²	Arah	Kec.	(µg/m ³)
1/1/10 0:30	0.00	88.17	0.28	33.35	1/1/10 12:30	209.52	357.88	0.49	11.77
1/1/10 1:00	0.00	90.61	0.11	44.04	1/1/10 13:00	374.94	306.89	0.64	21.85
1/1/10 1:30	0.00	349.86	0.03	38.12	1/1/10 13:30	372.06	276.26	1.52	14.65
1/1/10 2:00	0.00	312.04	0.20	54.10	1/1/10 14:00	221.29	316.54	1.45	12.99
1/1/10 2:30	0.00	343.95	0.14	37.57	1/1/10 14:30	20.74	48.29	5.39	7.80
1/1/10 3:00	0.00	296.60	0.08	47.55	1/1/10 15:00	18.99	70.06	0.87	9.59
1/1/10 3:30	0.00	281.86	0.61	39.65	1/1/10 15:30	27.18	231.48	1.09	25.93
1/1/10 4:00	0.00	209.62	0.46	33.65	1/1/10 16:00	34.61	289.68	0.04	22.13
1/1/10 4:30	0.00	242.28	0.57	26.35	1/1/10 16:30	17.58	81.97	0.18	49.71
1/1/10 5:00	0.00	257.81	0.11	22.12	1/1/10 17:00	7.53	262.21	0.14	49.04
1/1/10 5:30	0.19	221.23	0.01	23.85	1/1/10 17:30	1.13	190.06	0.50	45.50
1/1/10 6:00	5.38	221.22	0.03	31.64	1/1/10 18:00	0.00	174.07	0.88	19.16
1/1/10 6:30	10.59	221.26	0.02	28.80	1/1/10 18:30	0.00	161.00	0.40	16.70
1/1/10 7:00	17.33	228.11	0.07	36.25	1/1/10 19:00	0.00	131.96	0.09	21.98
1/1/10 7:30	21.25	121.57	1.30	33.26	1/1/10 19:30	0.00	123.92	0.00	35.88
1/1/10 8:00	43.92	355.51	0.03	28.53	1/1/10 20:00	0.00	66.94	0.08	27.35
1/1/10 8:30	55.77	281.86	0.29	40.62	1/1/10 20:30	0.00	14.24	0.23	29.17
1/1/10 9:00	94.15	259.20	0.18	31.80	1/1/10 21:00	0.00	322.69	0.75	47.44
1/1/10 9:30	99.28	341.93	0.52	27.06	1/1/10 21:30	0.00	311.60	0.24	58.97
1/1/10 10:00	96.80	347.18	1.01	27.92	1/1/10 22:00	0.00	27.49	0.17	40.51
1/1/10 10:30	90.55	351.40	1.00	25.65	1/1/10 22:30	0.00	68.68	0.01	45.61
1/1/10 11:00	115.42	337.85	0.91	33.89	1/1/10 23:00	0.00	167.73	0.15	46.97
1/1/10 11:30	122.05	357.32	1.31	24.69	1/1/10 23:30	0.00	176.07	0.03	37.05
1/1/10 12:00	131.65	331.07	0.47	19.57	1/2/10 0:00	0.00	176.08	0.07	30.99

Pada tahap ini data pembanding adalah data dari SUF4, karena pada waktu tersebut yang dapat merekam data dengan baik adalah alat pemantau udara yang dipasang di SUF4 saja. Sedangkan titik pemantau yang lain sedang tidak berfungsi. Dalam verifikasi tahap ini adanya data lengkap dari satu SUF sudah mencukupi untuk menilai model terbangun dapat diterapkan dengan baik atau tidak dengan

kondisi riil di lingkungan. Konsistensi hasil, simpangan, dan korelasi hasil model dengan data merupakan parameter penting dalam evaluasi ini.



Gambar 4.67 Pola dispersi estimasi konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pada 1 Januari 2010, 09:30 dan 14:30 WIB grid = 300 (Sumber: hasil estimasi, dihitung dan digambar dengan Matlab 2013a)

Tabel 4.24. Parameter penting dan Beban pencemar dari sumber beserta referensi

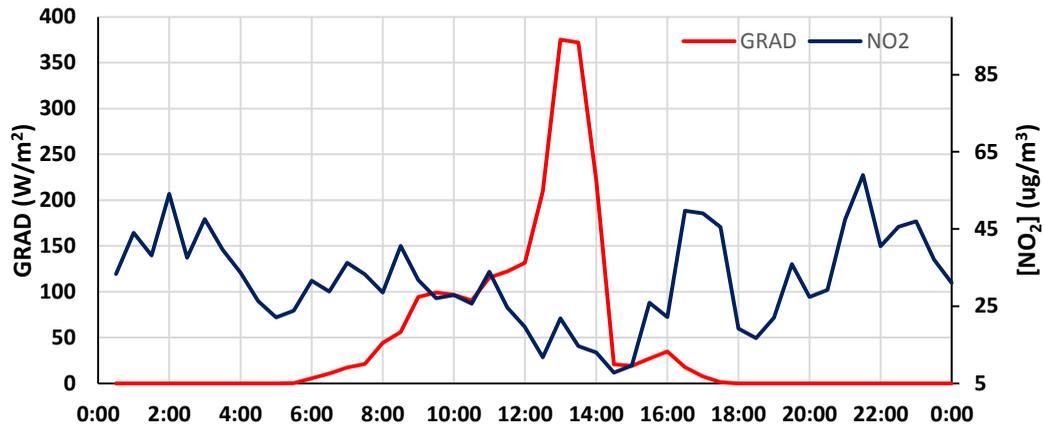
Parameter	Nilai	Satuan	Referensi
Beban Pencemar rata-rata			
Permukiman (area sources)		g/s	Boedisantoso, 2015; Hermana, dkk., 2013;
Transportasi (jalan)		g/s	Pradiptyas, dkk., 2011
Cerobong (point source)		g/s	
Volume traffic			
Primary Artery	4074	Average	Pradiptyas, dkk., 2011; Kusuma,
Scoundary Artery	3000	Traffic	2010; Hermana, dkk., 2013
Primary Collector	2015	Volume	

Parameter	Nilai	Satuan	Referensi
Secondary Collector	2548	(pvu/hours);	IPCC, 2010; Kusuma, 2010,
Local	504	approx.	Pradiptyas, dkk, 2011
Faktor Emisi Spesifik	0.000152	(g NO ₂ /smp.s)	

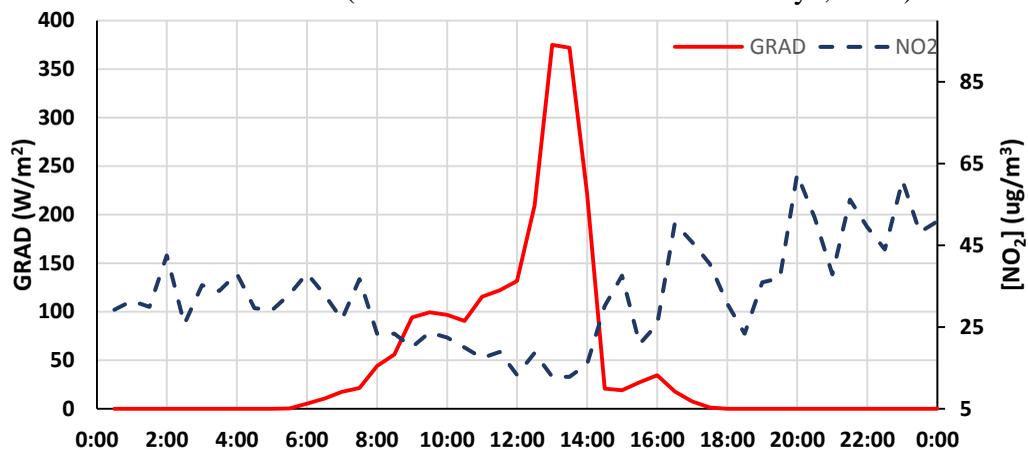
Hasil estimasi konsentrasi NO₂ di titik SUF4 menggunakan model terbangun dinyatakan pada Tabel 4.25 dan profilnya dinyatakan dalam Gambar 4.68. Secara umum data yang dihasilkan model berubah sesuai dengan profil angin dan GRAD. Sesuai dengan pembahasan kinetika sebelumnya, konsentrasi ambient NO₂ berbanding terbalik dengan GRAD. Semakin besar intensitas matahari (GRAD), maka laju pemecahan fotokimia NO₂ semakin besar dan sisa NO₂ di atmosfer semakin kecil. Nampak bahwa pada siang hari konsentrasi NO₂ cenderung turun baik menurut data SUF (Gambar 4.68) maupun menurut estimasi model (Gambar 4.69). Hal ini menunjukkan bahwa model terbangun mampu mengakomodasi proses kinetika ini dengan baik.

Tabel 4.25 Hasil estimasi konsentrasi pencemar NO₂ (µg/m³) titik lokasi SUF-4

Date,time	NO ₂	Date,time	NO ₂	Date,time	NO ₂	Date,time	NO ₂
1/1/10 0:30	29.2	1/1/10 6:30	32.9	1/1/10 12:30	18.7	1/1/10 18:30	23.3
1/1/10 1:00	31.4	1/1/10 7:00	26.8	1/1/10 13:00	12.8	1/1/10 19:00	36.0
1/1/10 1:30	29.9	1/1/10 7:30	36.7	1/1/10 13:30	12.8	1/1/10 19:30	37.0
1/1/10 2:00	42.5	1/1/10 8:00	23.3	1/1/10 14:00	15.9	1/1/10 20:00	62.4
1/1/10 2:30	25.7	1/1/10 8:30	23.4	1/1/10 14:30	30.2	1/1/10 20:30	51.7
1/1/10 3:00	35.3	1/1/10 9:00	20.1	1/1/10 15:00	37.6	1/1/10 21:00	37.9
1/1/10 3:30	33.8	1/1/10 9:30	23.6	1/1/10 15:30	20.9	1/1/10 21:30	56.2
1/1/10 4:00	38.1	1/1/10 10:00	22.4	1/1/10 16:00	25.7	1/1/10 22:00	49.4
1/1/10 4:30	29.6	1/1/10 10:30	20.0	1/1/10 16:30	50.4	1/1/10 22:30	43.9
1/1/10 5:00	29.2	1/1/10 11:00	17.4	1/1/10 17:00	45.8	1/1/10 23:00	60.8
1/1/10 5:30	33.0	1/1/10 11:30	18.9	1/1/10 17:30	40.5	1/1/10 23:30	48.2
1/1/10 6:00	38.1	1/1/10 12:00	13.3	1/1/10 18:00	30.7	1/2/10 0:00	50.9



Gambar 4.68 Profil konsentrasi NO₂ (data) dan GRAD terekam pada SUF-4, 1 Januari 2010 (diolah dari data BLH Kota Surabaya, 2015)



Gambar 4.69 Profil konsentrasi NO₂ (model terbangun) dan GRAD (SUF-4), 1 Januari 2010 (diolah dari estimasi model terbangun dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

4.9.2. Penentuan korelasi dan simpangan (*error*) hasil estimasi dibanding data pengukuran

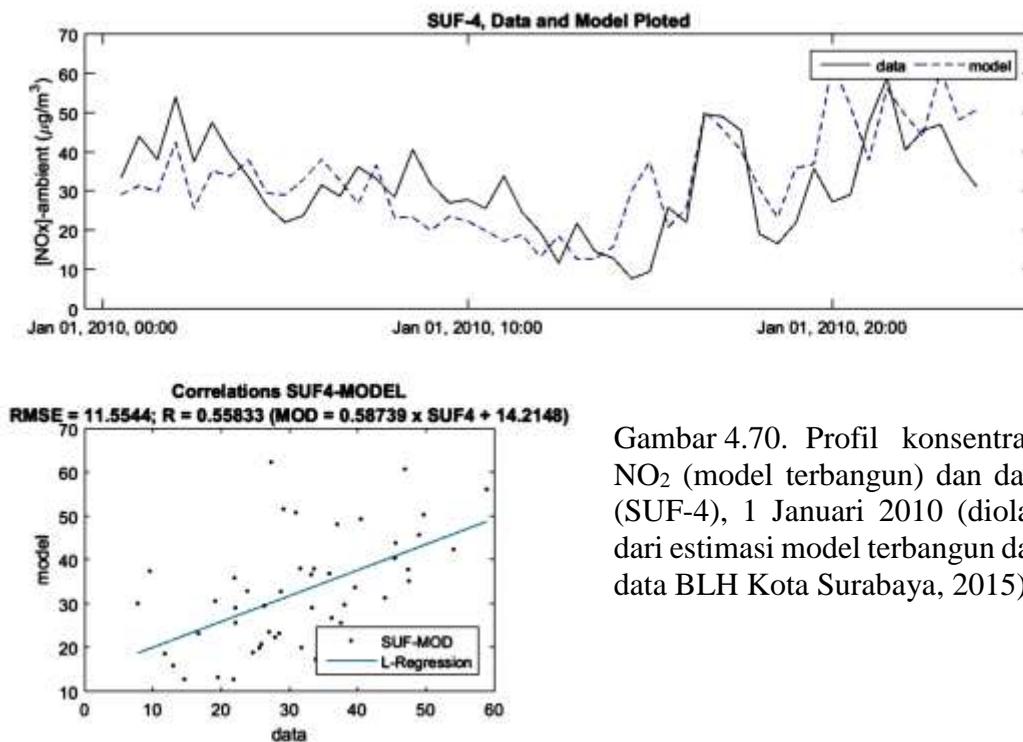
Data-data yang diperoleh dari perhitungan model terbangun kemudian dikorelasikan dengan data-data pengukuran. Korelasi keduanya dianalisis dari tiap waktu yang sama. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui kemiripan kecenderungan perubahan kedua data. Jika kedua seri data memiliki kecenderungan sama maka korelasi keduanya akan semakin baik, nilai korelasi mendekati 1.

Gambar 4.70 merepresentasikan kecenderungan kedua seri data (model dan pemantauan) yang diplot dalam satu grafik. Dari gambar tersebut nampak bahwa kedua seri data mempunyai kecenderungan yang mirip dalam satu siklus harian. Korelasi keduanya dinyatakan dengan $R = 0,558$. Nilai ini cukup mendekati

rekomendasi EPA untuk korelasi NO₂ (model dengan data) sebesar 0,572 (Sportisse, 2008). Beberapa faktor diperkirakan mempengaruhi hasil estimasi model sehingga korelasinya dengan data pengukuran menjadi agak buruk antara lain:

- Dalam riilnya, arah dispersi dan sumber pencemar yang tidak homogen sedangkan model menggunakan asumsi homogen
- Akumulasi konsentrasi karena jeda waktu pengambilan sampel tidak dapat diperhitungkan untuk membuat koreksi model. Model didesain untuk mengestimasi pada waktu tertentu dengan tidak ada akumulasi.
- Pada bulan yang dimodelkan ada kemungkinan hujan, sehingga terjadi flashing pencemar oleh air hujan. Model terbangun tidak mencakup hal tersebut.

Namun demikian, dengan korelasi yang cukup dekat dengan rekomendasi EPA cukup menyatakan bahwa model terbangun dapat diaplikasikan dengan baik.



Gambar 4.70. Profil konsentrasi NO₂ (model terbangun) dan data (SUF-4), 1 Januari 2010 (diolah dari estimasi model terbangun dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

Lebih lanjut analisis statistik sederhana untuk membandingkan hasil estimasi model dengan data dilakukan menggunakan indikator lain menurut rekomendasi EPA yaitu RMSE. Dinyatakan dalam tinjauan teori untuk parameter NO₂ dengan 1049 station, dengan obs rata-rata (23.9), hasil model rata-rata (15.3), RMSE (14.2), Corr (0,572) (Sportisse, 2008) dan (Sartelet, et al., 2007). Pada

penelitian ini stasiun data dianalogkan dengan jumlah data yang digunakan dalam korelasi, yaitu 48 data. Korelasi model dengan data pengukuran telah dijelaskan sebelumnya sebesar 0,558. Sedangkan RMSE dihitung 11,5544 (rata-rata model 32,8 dan rata-rata data 31,6) lebih kecil dari RMSE yang direkomendasikan yaitu 14.2 (rata rata model 15.3 dan data observasi 23.9). Dari analisis ini juga dapat diketahui simpangan atau ketelitian berdasarkan RMSE yaitu $11,55/32 = 36 \%$ (sementara menurut EPA $14.2/19.5 = 72.8\%$). Analisis tersebut menyatakan model terbangun cukup baik digunakan mengestimasi dispersi.

4.10. Aplikasi model terbangun untuk estimasi pola dispersi pencemar NO₂ di Kota Surabaya.

Verifikasi model terbangun menunjukkan hasil yang cukup baik menurut teori dispersi normal dan memberikan hasil dengan kesesuaian tinggi dengan model dispersi Gauss. Model terbangun juga memberikan hasil yang konsisten dengan grid minimal 300. Korelasi model terbangun dengan Gauss menunjukkan kesesuaian yang tinggi, R lebih dari 0.867; sementara korelasi dengan data lapangan Kota Surabaya dalam rentang 1 siklus harian dan 1 titik pembanding menunjukkan kesesuaian yang cukup dengan R sebesar 0.558. Nilai korelasi ini cukup dekat dengan standar EPA sebesar 0.572 dalam membandingkan model dengan data lapangan.

Untuk memastikan bahwa model terbangun konsisten memberikan hasil yang baik, diperlukan pengujian hasil estimasi dengan rentang aplikasi yang lebih panjang atau beberapa titik lokasi data pembanding. Maka pada pembahasan ini dijabarkan hasil aplikasi model terbangun dengan rentang waktu sampai 7 siklus harian dan 2 atau 3 seri data stasiun yang berbeda. Dengan interval 30 menit (sesuai data pembanding yang tersedia), maka pada rentang tersebut dihasilkan sebanyak $48 \times 7 = 336$ data estimasi pada tiap seri data. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan data pengukuran dengan waktu rekam sama dengan waktu estimasi model. Kecenderungan kedua data dianalisis untuk mengetahui korelasi dan simpangan yang dihasilkan (nilai R dan RMSE). Model terbangun dinyatakan baik jika nilai korelasi dan simpangan hasil estimasi pada rentang nilai yang dekat dengan standar EPA, ketika dibandingkan dengan data lapangan.

4.10.1. Penentuan data pembanding yang digunakan untuk verifikasi model terbangun

Ketersediaan data rekaman kualitas udara ambien yang terukur pada semua stasiun pemantauan kualitas udara ambien Kota Surabaya (SUF) dalam rentang 2010 – 2014 tidak lengkap. Pada rentang waktu tersebut SUF 4 telah merekam data kualitas lebih banyak dari SUF-SUF yang lain. Data-data tersebut disajikan dalam Tabel 4.26. Nampak pada tabel tersebut tidak ditemukan dalam satu waktu semua SUF beroperasi bersamaan.

Tabel 4.26 Ketersediaan Data NO₂ Kota Surabaya dalam rantang 2010 - 2014,

No	Rentang Waktu		SUF1	SUF2	SUF3	SUF4	SUF5	SUF6	SUF7
1	1-Jan-10	31-Jan-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
2	1-Feb-10	28-Feb-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
3	1-Mar-10	31-Mar-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
4	1-Apr-10	30-Apr-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
5	1-May-10	31-May-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
6	1-Jun-10	30-Jun-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
7	1-Jul-10	31-Jul-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
8	1-Aug-10	31-Aug-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
9	1-Sep-10	30-Sep-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
10	1-Oct-10	31-Oct-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
11	1-Nov-10	30-Nov-10	0	0	0	1111	0	NA	NA
12	1-Dec-10	31-Dec-10	0	0	0	0	0	NA	NA
13	1-Jan-11	15-Jan-11	0	0	0	0	0	NA	NA
14	16-Jan-11	31/15/2011	0	0	0	1111	0	NA	NA
15	1-Feb-11	28-Feb-11	0	0	0	1111	0	NA	NA
16	1-Mar-11	5-Apr-11	0	0	0	1111	0	NA	NA
17	6-Apr-11	30-Apr-11	1111	0	0	1111	0	NA	NA
18	1-May-11	31-May-11	1111	0	0	1111	0	NA	NA
19	1-Jun-11	31-Jul-11	1111	0	0	1111	0001	NA	NA
21	1-Aug-11	31-Aug-11	1111	0	0	1111	1111	NA	NA
22	1-Sep-11	30-Sep-11	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NA	NA
23	1-Oct-11	31-Oct-11	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NA	NA
24	1-Nov-11	30-Nov-11	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NA	NA
25	1-Dec-11	31-Dec-11	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	NA	NA
27	1-Jan-12	31-Jan-12	0001	0	0	0	0	NA	NA
28	1-Feb-12	29-Feb-12	1111	0	0001	0	0	NA	NA
30	1-Mar-12	31-Mar-12	1111	0	1111	1111	0	NA	NA
31	1-Apr-12	4-May-12	1000	0	1000	1000	0	NA	NA
34	1-Jun-12	30-Jun-12	1111	0	0	0	0	NA	NA
35	1-Jul-12	31-Jul-12	1110	0	0	0	0	NA	NA
37	1-Aug-12	31-Aug-12	1110	0	0	1110	0	NA	NA
39	1-Sep-12	30-Sep-12	1111	0	0	0	0	NA	NA
40	1-Oct-12	31-Oct-12	0011	0	0	1000	0	NA	NA
43	1-Nov-12	30-Nov-12	0011	0	0	0	0	0011	NA
44	1-Dec-12	31-Dec-12	1111	0	0	0	0	1111	NA
45	1-Jan-13	31-Jan-13	1111	0	0	1111	0	1111	NA
46	1-Feb-13	28-Feb-13	1000	0	0100	0100	0	1110	NA
47	1-Mar-13	31-Mar-13	0	0	1010	0	0	1100	NA
48	1-Apr-13	30-Apr-13	0	0	1100	0	0	0001	NA

No	Rentang Waktu		SUF1	SUF2	SUF3	SUF4	SUF5	SUF6	SUF7
49	1-May-13	31-May-13	0	0	0	0	0	1111	NA
50	1-Jun-13	30-Jun-13	0	0	0	0	0	1000	NA
51	1-Jul-13	31-Jul-13	0	0	0	0001	0	0110	NA
52	1-Aug-13	31-Aug-13	0	0	0	0	0	0001	NA
53	1-Sep-13	30-Sep-13	0	0	0	0	0	1110	NA
54	1-Oct-13	31-Oct-13	0	0	0	0	0	0011	NA
55	1-Nov-13	30-Nov-13	0	0	0	0	0	1000	NA
56	1-Dec-13	31-Dec-13	0	0	0	0	0	0000	NA
57	1-Jan-14	31-Jan-14	0	0	0	0	0	1111	1111
58	1-Feb-14	28-Feb-14	0	0	0	0	0	1011	1110
59	1-Mar-14	31-Mar-14	0	0	0	0	0	1111	0011
60	1-Apr-14	30-Apr-14	0	0	0	0	0	1111	1111
61	1-May-14	31-May-14	0	0	0	0	0	1111	1111
62	1-Jun-14	30-Jun-14	0	0	0	0	0	1111	1111

Keterangan : 1 = ada; 0 = tidak ada; 1111 = cek tgl 1, 10, 20, 28/29/30/31, NA = tidak ada alat, sumber : BLH Kota Surabaya, 2015

Ada beberapa waktu ditemukan 3 SUF beroperasi merekam data yaitu Agustus 2011, Maret 2012, dan Januari 2013. Selebihnya hanya 2 SUF atau 1 SUF yang beroperasi. Bahkan dalam rentang September – Desember 2011 semua SUF dalam keadaan tidak beroperasi. Memperhatikan ketersediaan data tersebut, maka diperlukan seleksi data yang akan digunakan untuk melakukan verifikasi model terbangun sesuai tujuan yang disebutkan di atas.

- Untuk memverifikasi hasil dalam rentang waktu 7 siklus harian atau lebih, digunakan data yang direkam dari SUF 4. Data dari SUF 4 ini dipilih karena stasiun ini yang lebih konsisten memberikan data rekaman terutama dalam kurun waktu 2010-2013. Dengan demikian SUF 4 ini dapat menyediakan data lebih banyak untuk pilihan-pilihan data yang diperlukan analisis.
- Untuk verifikasi dengan data 7 siklus harian dari 3 SUF, digunakan data dalam rentang waktu awal Agustus 2011 atau awal Maret 2012. Pada rentang waktu tersebut data pembandingan disediakan dari SUF1, SUF3 atau SUF5, dan SUF4.

4.10.2. Ketersediaan data pendukung dan inputan model terbangun

Hasil estimasi yang dihasilkan model terbangun harus mengakomodasi perubahan-perubahan parameter lapangan di Kota Surabaya dan fungsi penggambaran kontur dispersi pencemar. Parameter-parameter tersebut utamanya yang mempengaruhi dispersi pencemar yaitu arah dan kecepatan angin, fluktuasi

beban emisi dari sumber, dan jenis sumber. Fungsi dan ketersediaan data untuk parameter-parameter tersebut adalah:

- Peta dasar tataguna lahan Kota Surabaya dan peta pendekatan jalan. Peta ini digunakan untuk identifikasi jenis sumber dan lokasinya (koordinat). Untuk keperluan identifikasi sumber ini juga diperlukan data-data jenis jalan, permukiman, *stack* industri, dan sebagainya.
- Arah dan kecepatan angin berpengaruh pada jarak dan arah dispersi. Data inputan untuk arah dan kecepatan angin tersedia pada tiap SUF. Data dari SUF yang relevan dirata-rata sebagai inputan model terbangun, sesuai waktu estimasi.
- Fluktuasi beban emisi dan jenis sumber berpengaruh pada konsentrasi dispersi. Dinamika Kota Surabaya atau kota-kota lain pada umumnya, menyebabkan adanya fluktuasi beban emisi dari tiap-tiap sumber yang berbeda. Sebagai contoh adalah aktifitas transportasi. Siklus aktifitas transportasi dapat terjadi harian, mingguan, atau tahunan. Dalam siklus harian, volume trafik bervariasi ketika jam puncak (pagi dan sore), rata-rata, dan minimum (dini hari). Dalam siklus mingguan terjadi perbedaan yang besar ketika awal pekan, rata-rata seminggu, atau hari libur. Data-data volume trafik ini tersedia di Kota Surabaya baik dari Dishub dan penelitian terdahulu yang dipublikasi. Demikian juga untuk sumber titik dan area, data-data tersedia dari penelitian terdahulu yang dipublikasi.

Data-data yang menjelaskan parameter inputan untuk model terbangun dikumpulkan dari berbagai sumber antara lain BLH, Dishub Kota Surabaya, Penelitian terdahulu oleh Laboratorium Pengelolaan Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim (LPPUPI) Teknik Lingkungan ITS pada rentang waktu yang sesuai.

4.10.2.1. Data pendukung untuk perhitungan emisi, dispersi dan pengaturan batasan model dispersi

Data-data pendukung yang diperlukan untuk menghitung emisi dari beberapa jenis sumber emisi, kriteria penentu dispersi, dan pengaturan model dispersi antara lain dicantumkan dalam Tabel 4.27 sampai Tabel 4.29. Data-data dan

nilai pengaturan model didasarkan pada referensi penelitian terdahulu dan keadaan yang memungkinkan berdasarkan verifikasi model terbangun (sub bab 4.7 dan 4.8).

Nilai-nilai parameter dominan untuk mengestimasi dispersi antara lain:

Tabel 4.27 Parameter dominan dalam estimasi dispersi model terbangun

No	Paramater	Simbol	Nilai	satuan
1	Koefisien dispersi arah horisontal	D_y	1.75	Torr.cm ² /s
2	Koefisien dispersi arah vertikal	D_z	1.75	Torr.cm ² /s
3	Temperatur Ambien	T_0	30	C
4	Kecepatan angin rata-rata (dominant)	s	-“-	m/s
5	Arah angin rata-rata (dominant)	a	-“-	0 (N)
6	Parameter Analysis	NO ₂	Oxides Nitrogen	
7	Konstanta kinetika	λ		

Sedangkan untuk menjalankan model terbangun beberapa nilai pengaturan model dan penentuan batas digunakan sesuai dengan Tabel 4.28 dan Tabel 4.29 berikut:

Tabel 4.28 Nilai pengaturan model terbangun

Pengaturan Model				
1	Tanggal mulai, waktu		1/1/2010 0:30	
2	Interval analisis		0.5	jam
3	Jumlah Grid		300	n x n
4	Rata-rata panjang per grid (l, w), dimodelkan	93.3	60	m
Penentuan Jumlah Grid				
1	Panjang Wilayah (asumsi persegi)		28.00	km
2	Lebar Wilayah (asumsi persegi)		18.00	km
3	Area dimodelkan per grid (persegi)		5600.00	m ²
4	Jumlah grid		300.00	n x n

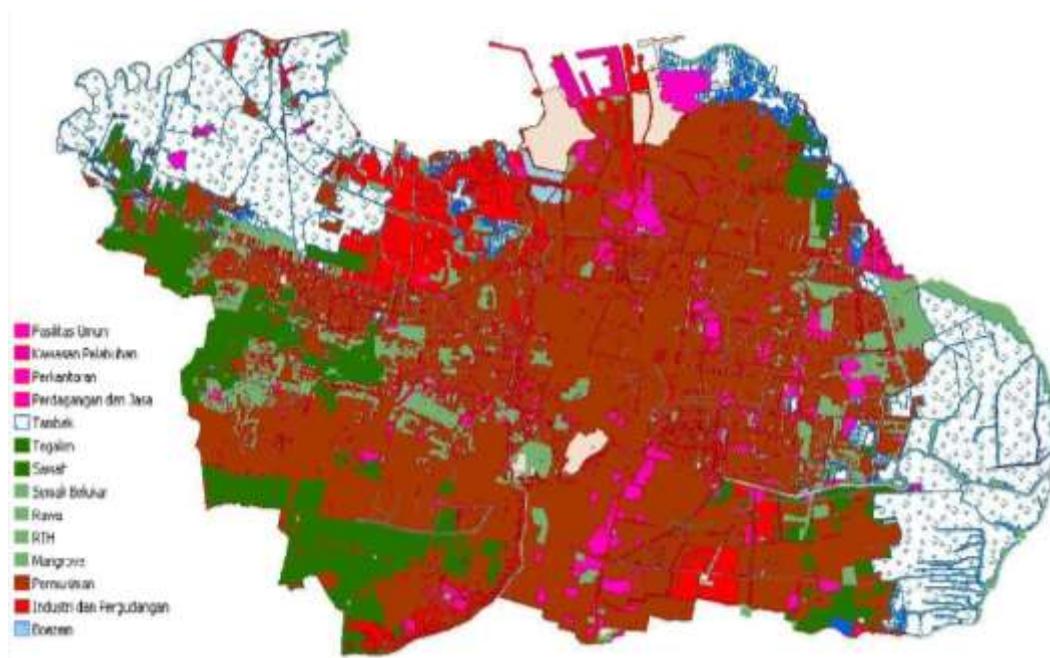
Peta yang dimasukkan dalam model merupakan file dalam format gambar tanpa koordinat digital. Agar dapat diproses digitasi dalam MATLAB diperlukan digitasi koordinat yang *dioverlay* pada peta. Batasan digitasi koordinat tersebut dinyatakan dalam Tabel 4.29.

Tabel 4.29 Penentuan koordinat dan batas wilayah pemodelan

Parameter			
1	Lattitude terendah; min_x (LS)	112.580	0 (E)
2	Lattitude tertinggi; max_x (LS)	112.859	0 (E)
3	Longitude terendah; min_y (BT)	-7.365	0 (S)
4	Longitude tertinggi; max_y (BT)	-7.180	0 (S)

4.10.2.2. Peta tata guna lahan Kota Surabaya dan Sumber Emisi Area

Peta tata guna lahan yang digunakan pada penelitian ini adalah peta tahun 2010, sesuai dengan tujuan estimasi dan data kualitas udara pembandingan yaitu tahun 2010 dan 2011. Dalam rentang waktu tersebut diasumsikan belum terjadi perubahan kondisi yang signifikan sehingga jenis dan jumlah sumber hasil identifikasi diasumsikan sama. Peta tata guna lahan tersebut ditampilkan pada Gambar 4.71.



Gambar 4.71 Peta tata guna lahan Kota Surabaya tahun 2010, sumber:

Pendekatan penentuan sumber area didasarkan pada peta tata guna lahan di atas. Kawasan yang dinotasikan dengan fasilitas umum, kawasan pelabuhan, perkantoran, perdagangan dan jasa, permukiman, serta industri dan pergudangan pada Gambar 4.71, dikonversi menjadi notasi sumber emisi area dalam model terbangun. Sedangkan notasi lainnya seperti tambak, tegalan, sawah, semak belukar, rawa, RTH, mangrove, dan boezem dikonversi menjadi area bukan emisi. Pendekatan konversi sumber area ini dilakukan dengan membagi peta dasar administrasi Kota Surabaya (Gambar 4.53) ke dalam grid-grid dengan ukuran 0.01 x

0.01 deg LS maupun BT. Kemudian area-area emisi dimasukkan ke dalam grid yang sesuai.

Hasil konversi area emisi ini ke dalam grid dapat dilihat pada Gambar 4.72. Gambar terakhir ini yang dijadikan dasar inputan model terbangun untuk sumber area dan koordinat yang diperlukan. Inputan ini diisikan dalam format excel yang memuat tentang identifikasi sumber area (dengan nomor atau nama area), koordinat LS dan BT, jenis area (permukiman mewah, menengah, sederhana, perkantoran, industri, dsb), beban emisi rata-rata. Contoh hasil konversi ini dapat dilihat pada Tabel 4.30. Hasil lengkap konversi ini ada pada Lampiran .

Tabel 4.30 Contoh inputan untuk sumber emisi area

Identitas Area	Koordinat awal - akhir				densitas (jumlah sumber/grid)	kategori	beban rata-rata (g/s.grid)
	y-in	y-fin	x-in	x-fin			
Galaxy	-7.---	-7.---	112.--	112.--	15	High Class Residence	0.058
Semolowaru	-7.---	-7.---	112.--	112.--	41	Middle Class Residence	0.123
Keputih	-7.---	-7.---	112.--	112.--	169	Low Class Residence	0.377
Kantor Pemkot	-7.---	-7.---	112.--	112.--	61	Office Area	0.185
SIER	-7.---	-7.---	112.--	112.--	4	Industrial Area	0.783
dst	-7.---	-7.---	112.--	112.--	41	Bussiness Area	0.371
.....

Nilai densitas (jumlah sumber tiap grid) dan beban rata-rata area (g/s.grid) didekati menggunakan data-data penelitian terdahulu dan ketetapan kriteria permukiman sesuai SKB Mendagri, MenPU, dan Menpera No. 648-384 tahun 1992. Data-data pendukung tersebut ditampilkan pada Tabel 4.31. Dari data-data tersebut dapat dihitung estimasi rata-rata emisi dan luasan tiap area. Dengan membagi luasan tiap grid dengan luasan tiap sumber area diperoleh jumlah sumber emisi area tiap grid (densitas). Mengalikan rata-rata emisi tiap sumber dengan jumlah sumber tiap grid akan diperoleh beban rata-rata tiap grid.

Tabel 4.31 Jenis Permukiman, Penggunaan Bahan Bakar, dan luasan rata-rata, Kota Surabaya

Jenis Rumah	Rata-rata penghuni (jiwa)	Rata-rata LPG (kg/bulan)	Luas Area rata-rata (m2)
Rumah Mewah	4.86	17.6	600 - 2000

Rumah Menengah	4.56	13.88	200 - 600
Rumah Sederhana	3.57	10.15	54 - 200
Rumah Kumuh/Liar	3.79	3.63	<54
Referensi	(Boedisantoso, 2014)		SKB Mendagri, Men PU, dan Menpera No. 648-384 tahun 1992

Menghitung beban emisi rata-rata tiap area permukiman dilakukan berdasarkan penggunaan bahan bakar aktivitas permukiman (LPG). Menggunakan nilai faktor emisi terhitung NO₂ sebesar 0.1419 g NO₂/kg LPG, maka nilai emisi tiap jenis permukiman dapat dihitung. Beban emisi tiap permukiman dihitung dengan mengalikan rata-rata penggunaan LPG dengan faktor emisi LPG. Hasil perhitungan tersebut dinyatakan pada Tabel 4.32 sebagai berikut:

Tabel 4.32 Hasil Perhitungan besar emisi NO₂ per jenis rumah

Jenis Rumah	Rata-rata LPG (kg/bulan)	Rata-rata LPG (kg/s)	Emisi NO ₂ (g/bulan)	Emisi NO ₂ (g/s)
Rumah Mewah	17.6	1.35802E-05	2.49744	1.92704E-06
Rumah Menengah	13.88	1.07099E-05	1.96957	1.51973E-06
Rumah Sederhana	10.15	7.83179E-06	1.44029	1.11133E-06
Rumah Kumuh/Liar	3.63	2.80093E-06	0.51510	3.97451E-07
Referensi	(Boedisantoso, 2014)		Hasil Perhitungan	

4.10.2.3. Volume traffic Kota Surabaya dan sumber emisi garis

Volume trafik jalan menunjukkan jumlah kendaraan yang melintasi suatu ruas jalan pada satuan waktu tertentu. Data trafik ini diperoleh dari hasil survei atau *counting* pada ruas jalan selama interval waktu tertentu. Pada penelitian ini digunakan data hasil *counting* atau publikasi penelitian terdahulu yang relevan. Pada ruas jalan yang tidak ada data *counting* maka nilai volume trafik didekati dengan nilai trafik dari ruas jalan yang terhubung atau ruas jalan lain yang mempunyai kelas sama. Dari nilai volume trafik ini dikombinasikan dengan kebutuhan bahan bakar per jarak tempuh dan kecepatan rata-rata maka dapat diketahui kebutuhan beban emisi (g NO₂/smp.s). Data dan faktor emisi dapat dilihat pada Tabel 4.33.

Tabel 4.33 Volume trafik rata-rata dan faktor emisi NO₂ satuan mobil penumpang

Jenis Jalan	Volume traffic	Referensi
-------------	----------------	-----------

High Way (Tol)			Pradiptyas, 2011; Kusuma, 2010; Hermana, dkk., 2013
Primary Artery	4074	Average Traffic	
Secondary Artery	3000	Volume	
Primary Collector	2015	(pvu/hours);	
Secondary Collector	2548	approx.	
Local	504		
Faktor Emisi Spesifik	0.000152	(g NO ₂ /smp.s)	IPCC, 2010; Kusuma, 2010, Pradiptyas, dkk, 2011

Contoh hasil konversi beban emisi dinormalkan dengan kecepatan rata-rata dapat dilihat pada Tabel 4.34. Hasil lengkap konversi ini ada pada Lampiran.

Tabel 4.34 Contoh inputan untuk line source model terbangun

Identitas Ruas Jalan	Kelas Jalan	Vol traffic maksimum (pvu/jam)	speed average (km/jam)	normalized average load (g/s)
Jl. A Yani	Primary Artery	14533	40	82.89
Jl. Wonokromo	Primary Artery	22657	30	144.74
Jl. Raya Darmo	Primary Artery	15125	40	85.56
Jl. Basuki Rahmat -Tunjungan	Secondary Artery	8668	40	49.44
Jl. Jend Sudirman - Urip Sumoharjo	Secondary Artery	10331	50	51.86
Jl. Diponegoro	Primary Artery	8159	50	40.95
Jl. Kedungdoro - Blauran - Bubutan	Secondary Artery	5825	30	37.22
Jl. Gemblongan - Veteran	Secondary Artery	5119	30	32.70
Jl. Indrapura	Secondary Artery	3492	50	15.93
dst	dst	dst	dst	dst

4.10.2.4. Data industri dan sumber emisi titik

Secara umum pengembangan wilayah Kota Surabaya adalah kota bisnis dan perdagangan dengan demikian tidak diijinkan adanya stack industri yang melepaskan emisi di Kota Surabaya. Seluruh industri telah dipindahkan di kawasan khusus seperti SIER atau ke kota lain. Namun demikian tahun 2010 masih ada 2 titik emisi dari stack yang dianggap berpengaruh pada kualitas udara ambien surabaya. Kedua titik tersebut berada di sekitar lokasi SUF 4. Pendekatan inputan untuk kedua titik tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.35 berikut:

Tabel 4.35 Inputan untuk sumber titik pada model terbangun (tentative)

Identitas point	Koord-y	Koord-x	Tinggi efektif (m)	Diameter (m)	Kec alir (m/s)	Emisi (g/m ³)	Beban (g/s)
1	-7.335729	112.71263	60	1.5	4	1.5	22

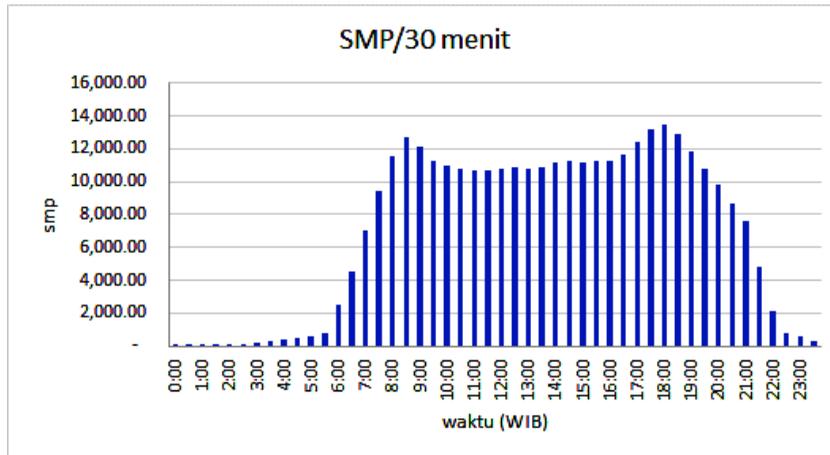
4.10.3. Aplikasi time series model terbangun

Model terbangun dijalankan dengan inputan-inputan yang disiapkan pada point 4.10.2. Hasil estimasi dari proses ini adalah distribusi konsentrasi pada area yang dimodelkan untuk satu waktu. Estimasi untuk waktu-waktu yang lain diperlukan pengulangan menjalankan model terbangun dengan parameter yang berubah seperti arah dan kecepatan angin serta beban emisi dari sumber. Pada penelitian ini model terbangun dijalankan dengan interval perubahan pola dispersi tiap 30 menit, disesuaikan dengan interval pembacaan hasil monitoring di SUF.

Untuk menjalankan model terbangun agar mendapatkan estimasi distribusi konsentrasi pencemar dengan *time series*, maka inputan juga disiapkan *time series* dengan interval yang sama. Parameter-parameter inputan yang harus disiapkan *time series* sesuai interval model antara lain:

- data radiasi (GRAD) pada interval model tiap 30 menit
- data arah dan kecepatan angin hasil monitoring tiap 30 menit
- perubahan beban emisi tiap 30 menit. Beban emisi ini ditentukan sesuai dengan jenis sumber pencemar. Beban emisi dari sumber area (permukiman) dan titik (industri) untuk sementara diasumsikan sama dalam interval waktu modeling. Beban emisi dari sumber garis (aktivitas transportasi) mengikuti pola kepadatan transportasi, dengan mengakomodasi maksimum, minimum, jam puncak, hari puncak dan sebagainya.

Pola perubahan beban emisi dari kegiatan transportasi (*line source*) ditentukan berdasarkan perubahan hasil *counting volume traffic* yang dilakukan sepanjang satu siklus harian atau mingguan. Hasil penelitian terdahulu menyatakan jam puncak terjadi sekitar pukul 07 – 08 WIB dan 16-16.30 WIB pada hari-hari kerja. Sedangkan siklus mingguan hari puncak terjadi pada hari Senin dan Hari Jumat. Pola perubahan volume trafik harian dan mingguan dapat dilihat pada Gambar 4.72 berikut:

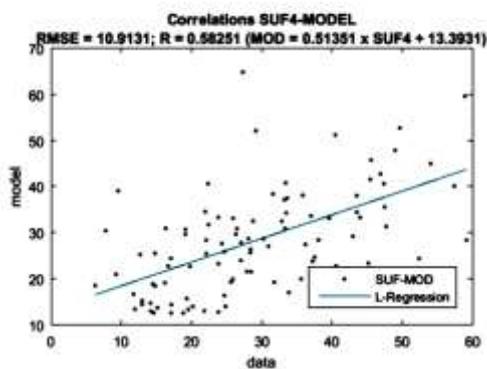
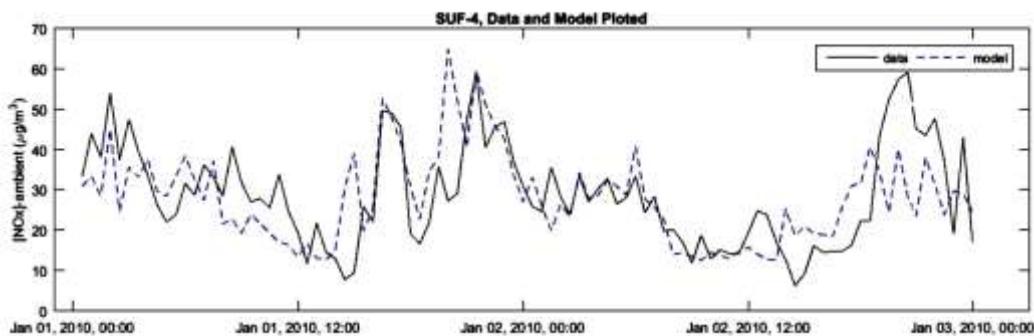


Gambar 4.72 Pola perubahan trafik harian Kota Surabaya (hermana, 2012, pradiptyas 2011,dishub 2016)

4.10.4. Hasil estimasi model terbangun

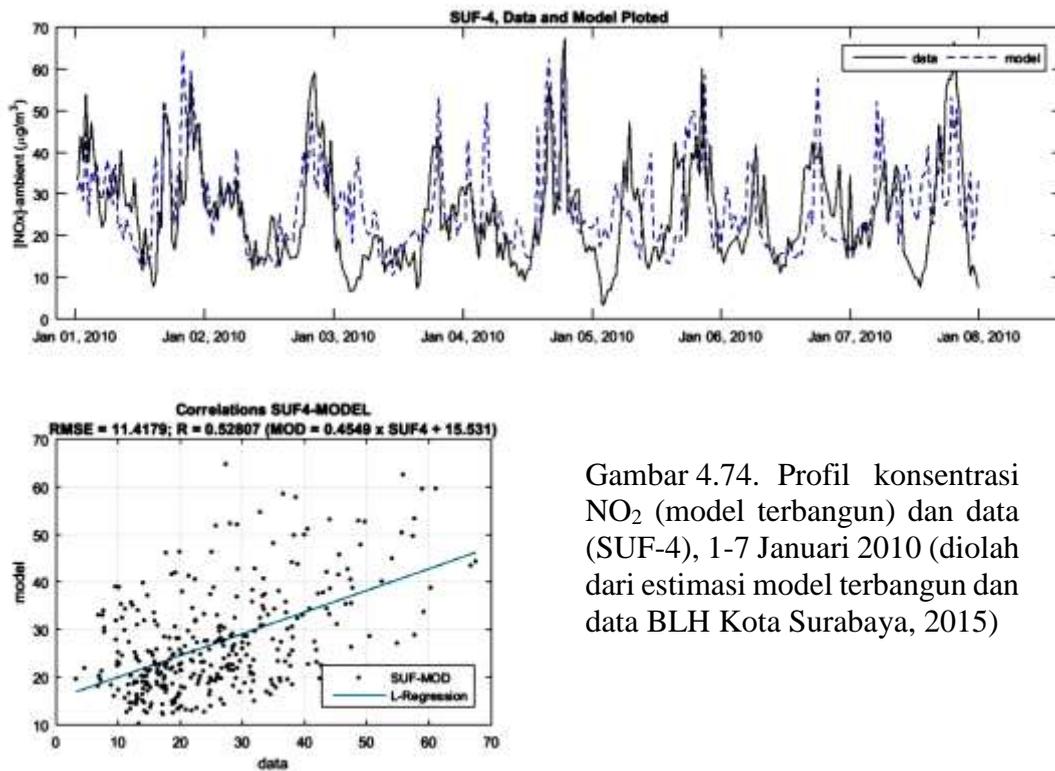
Aplikasi model terbangun untuk menghitung distribusi pencemar di area model telah dilakukan menggunakan inputan seperti yang telah disiapkan. Melanjutkan hasil verifikasi model pada sub bab 4.7 dan menggunakan grid optimum hasil sub bab 4.8, aplikasi model terbangun dijalankan untuk estimasi dan dibandingkan dengan data pada SUF4, SUF1, dan SUF3. Hasil aplikasi tersebut adalah:

- estimasi time series 2 siklus harian yaitu 1 – 2 Januari 2010 dengan interval 30 menit, sehingga dihasilkan data estimasi 48 data per siklus dikalikan 2 siklus yaitu sebanyak 96 data. Hasil estimasi dipilih dengan lokasi yang sama dengan SUF 4, kemudian dibandingkan dengan data monitoring pada SUF tersebut. Kedua data (estimasi dan pengukuran) ditampilkan pada Gambar 4.73. Secara visual kedua data memiliki kemiripan yang baik. Kecenderungan naik atau turun konsentrasi pada lokasi model dan data monitoring menunjukkan pola yang sama. NO₂ maksimum sama-sama terjadi pada malam hari dan konsentrasi minimum pada siang hari. Hal ini sesuai dengan kajian sebelumnya bahwa konsentrasi NO₂ berbanding terbalik dengan ketersediaan intensitas radiasi matahari (GRAD).



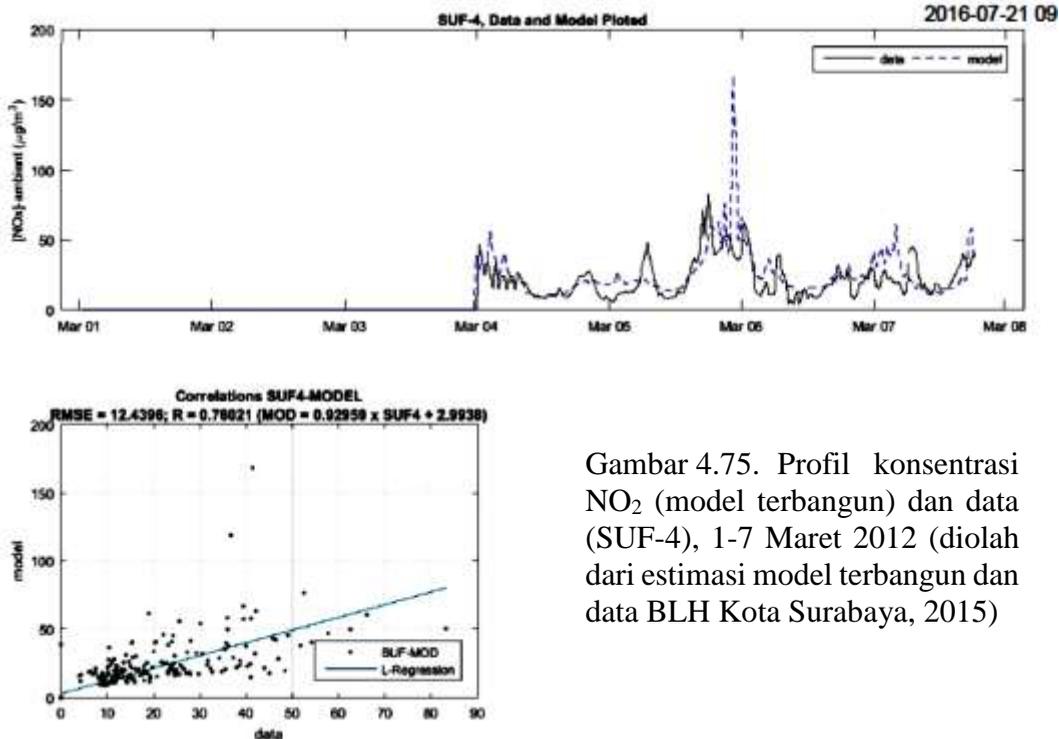
Gambar 4.73. Profil konsentrasi NO_2 (model terbangun) dan data (SUF-4), 1-2 Januari 2010 (diolah dari estimasi model terbangun dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

- o estimasi time series 7 siklus harian yaitu 1 – 7 Januari 2010 dengan interval 30 menit, sehingga dihasilkan data estimasi 48 data per siklus dikalikan 7 siklus yaitu sebanyak 336 data. Langkah ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa model masih berjalan dengan baik pada range estimasi lebih panjang. Hasil estimasi dipilih dengan lokasi yang sama dengan SUF 4, kemudian dibandingkan dengan data monitoring pada SUF tersebut. Kedua data (estimasi dan pengukuran) ditampilkan pada Gambar 4.74. Secara visual kedua data memiliki kemiripan yang masih cukup baik. Kecenderungan naik atau turun konsentrasi pada lokasi model dan data monitoring menunjukkan pola yang hampir sama. NO_2 maksimum sama-sama terjadi pada malam hari dan konsentrasi minimum pada siang hari. Namun banyak titik yang memberikan jarak cukup signifikan antara hasil estimasi dengan data monitoring. Banyak faktor yang harus dikaji lebih dalam yang mempengaruhi hasil estimasi maupun data monitoring, seperti kemungkinan adanya hujan. Adanya hujan memberikan kemungkinan data yang lebih rendah akibat *flashing* pencemar oleh air hujan. Model terbangun belum mengakomodasi adanya hujan. Beberapa kejadian nampak bahwa hasil estimasi lebih tinggi dari data monitoring, mungkin disebabkan hal tersebut.



Gambar 4.74. Profil konsentrasi NO₂ (model terbangun) dan data (SUF-4), 1-7 Januari 2010 (diolah dari estimasi model terbangun dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

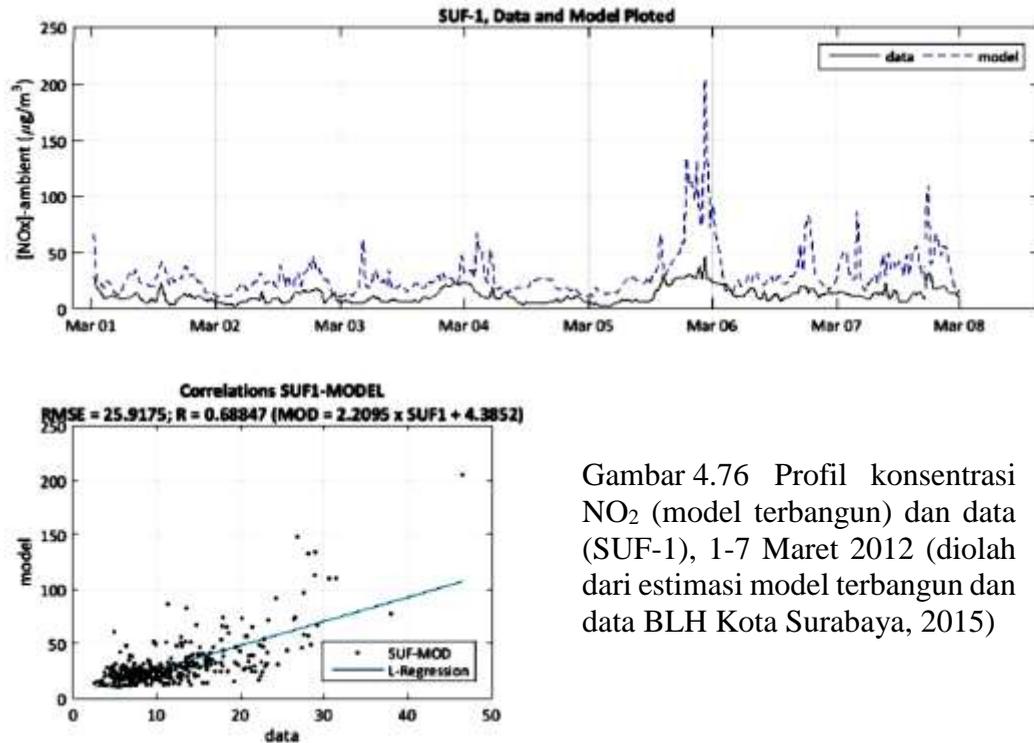
- o estimasi time series 4 siklus harian yaitu 4 – 7 Maret 2012 dengan interval 30 menit, sehingga dihasilkan data estimasi 48 data per siklus dikalikan 4 siklus yaitu sebanyak 196 data. Langkah ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa model masih berjalan dengan baik pada range waktu yang berbeda. Kisaran waktu yang berbeda ini memungkinkan adanya pengaruh yang berbeda dari proses *running* sebelumnya. Seharusnya langkah ini dilakukan dengan *range* 7 hari, tetapi karena pada 3 hari pertama data monitoring tidak tersedia, maka hasil estimasi untuk 3 hari pertama juga dianulir.



Gambar 4.75. Profil konsentrasi NO₂ (model terbangun) dan data (SUF-4), 1-7 Maret 2012 (diolah dari estimasi model terbangun dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

Hasil estimasi dan data monitoring pada SUF ditampilkan pada Gambar 4.75. Secara visual kedua data memiliki kemiripan yang masih cukup baik. Kecenderungan naik atau turun konsentrasi pada lokasi model dan data monitoring, NO₂ maksimum dan minimum terjadi dengan kemiripan hasil sebelumnya. Demikian juga banyak titik yang memberikan jarak cukup signifikan antara hasil estimasi dengan data monitoring, seperti hasil sebelumnya.

- o estimasi time series 7 siklus harian yaitu 1 – 7 Maret 2012 dengan interval 30 menit, sehingga dihasilkan data estimasi 48 data per siklus dikalikan 7 siklus yaitu sebanyak 336 data. Langkah ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa model masih berjalan dengan baik pada estimasi di lokasi lain. Hasil estimasi dipilih dengan SUF 1 dan SUF 3, sesuai dengan ketersediaan data monitoring pada rentang waktu tersebut. Hasil estimasi kemudian dibandingkan dengan data monitoring pada SUF yang relevan. Kedua data (estimasi dan pengukuran) untuk masing-masing lokasi SUF ditampilkan pada Gambar 4.76 dan Gambar 4.77. Secara visual kedua data memiliki kemiripan yang masih cukup baik. Kecenderungan hasil estimasi hampir sama dengan kecenderungan data monitoring.

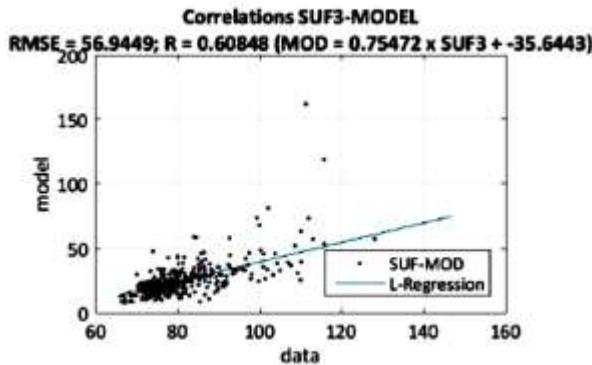
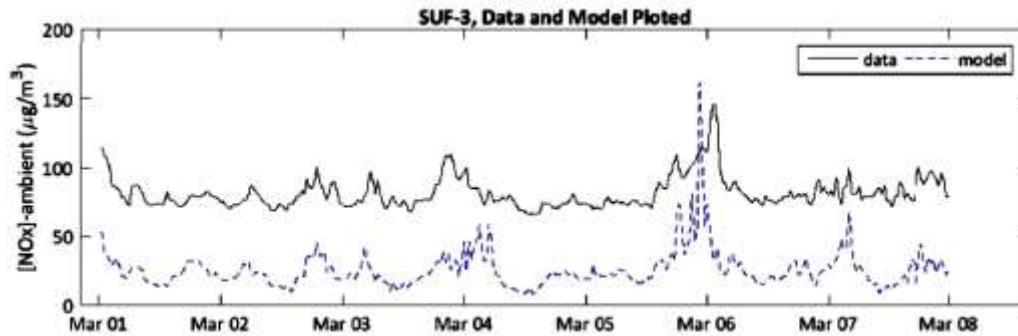


Gambar 4.76 Profil konsentrasi NO₂ (model terbangun) dan data (SUF-1), 1-7 Maret 2012 (diolah dari estimasi model terbangun dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

Pada lokasi SUF 1 (Gambar 4.76), hasil estimasi model secara keseluruhan lebih tinggi dari data pengukuran. Dengan beban pencemar yang relatif sama dengan SUF 4, data monitoring di SUF 1 secara konsisten menunjukkan hasil yang rendah (konsentrasi NO₂ rata-rata < 20 ug/m³). Pada kondisi yang sama, perhitungan dispersi menunjukkan konsentrasi rata-rata sekitar 40 ug/m³. Beberapa faktor berpengaruh seperti dijelaskan sebelumnya.

Sedangkan pada lokasi SUF 3 (Gambar 4.77), hasil estimasi model secara keseluruhan lebih rendah dari data pengukuran. Dengan beban pencemar yang relatif sama dengan SUF 4, data monitoring di SUF 3 secara konsisten menunjukkan hasil yang tinggi (konsentrasi NO₂ rata-rata > 75 ug/m³). Pada kondisi yang sama, perhitungan dispersi menunjukkan konsentrasi rata-rata sekitar 30 ug/m³.

Perbedaan nilai antara model dengan data pengukuran menunjukkan bahwa model perlu dikalibrasi lebih lanjut ketika diterapkan. Secara kasar, faktor kalibrasi dapat ditentukan sebesar nilai simpangan pada uji korelasi.



Gambar 4.77 Profil konsentrasi NO₂ (model terbangun) dan data (SUF-3), 1-7 Maret 2012 (diolah dari estimasi model terbangun dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

4.10.5. Korelasi dan Simpangan estimasi model terbangun dengan data pengukuran

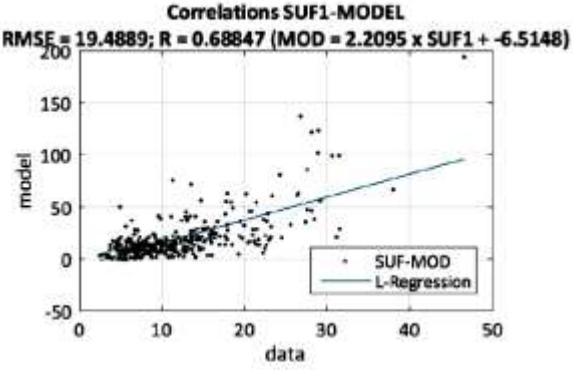
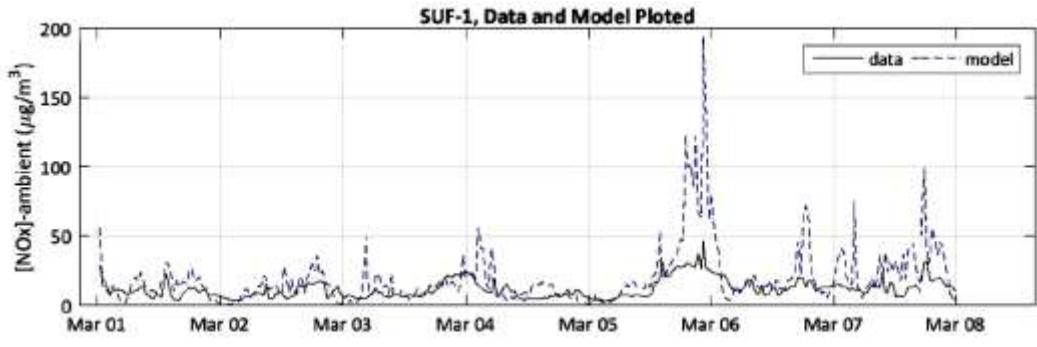
Lebih lanjut analisis statistik untuk membandingkan hasil estimasi model dengan data dilakukan menggunakan indikator menurut rekomendasi EPA yaitu korelasi dan RMSE. Dinyatakan dalam tinjauan teori untuk parameter NO₂ dengan 1049 station, dengan obs rata-rata (23,9), hasil model rata-rata (15,3), RMSE (14,2), Corr (0,572) (Sportisse, 2008) dan (Sartelet, et al., 2007). Pada penelitian ini stasiun data dianalogkan dengan jumlah data yang digunakan dalam korelasi, yaitu $48 \times 2 = 96$ data (untuk estimasi 2 hari di SUF4), $48 \times 7 = 336$ data (untuk estimasi 7 siklus harian), dan $48 \times 4 = 196$ data (untuk estimasi 4 siklus harian).

Korelasi model dengan data pengukuran pada lokasi yang sama SUF 4 telah dijelaskan berturut-turut sebesar 0,58 (2 siklus harian, 1-2 Januari 2010), 0,528 (7 siklus harian, 1 -7 Januari 2010), dan 0,76 (4 siklus harian, 4-7 Maret 2012). Sedangkan RMSE dihitung $11 - 12,4$ (rata-rata model 32,8 dan rata-rata data 31,6) lebih kecil dari RMSE yang direkomendasikan yaitu 14,2 (rata rata model 15,3 dan data observasi 23,9). Dari analisis ini juga dapat diketahui simpangan atau ketelitian berdasarkan RMSE yaitu $11,55/32 = 36 \%$ (sementara menurut EPA $14,2/19,5 =$

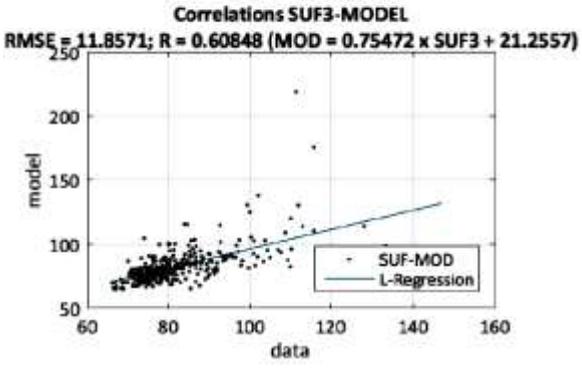
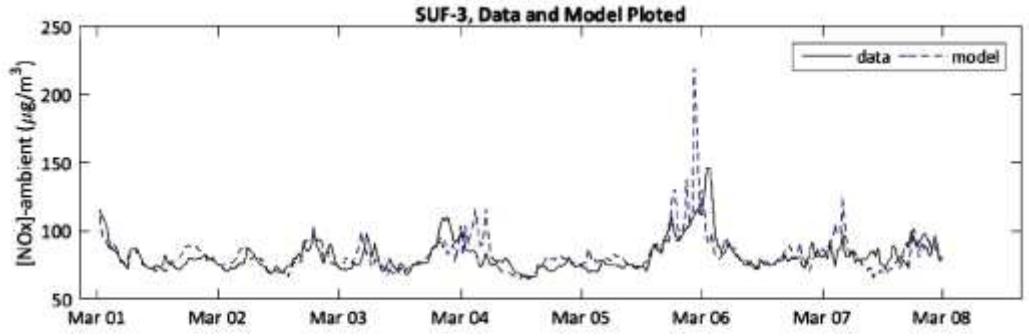
72,8%). Analisis tersebut menyatakan model terbangun cukup baik digunakan mengestimasi dispersi pada lokasi SUF 4. Secara analisis model terbangun cukup verified dan memberikan hasil yang baik ketika dibandingkan dengan teori dispersi, model terdahulu (model Gauss), dan data series monitoring pada satu lokasi terpilih yaitu SUF 4.

Sedangkan korelasi model dengan data pengukuran pada lokasi yang berbeda SUF 1 dan SUF 3 adalah 0,69 (7 siklus harian, 1-7 Maret 2012 di SUF 1) dan 0,61 (7 siklus harian, 1-7 Maret 2012 di SUF 3). Korelasi yang lebih besar dari rekomendasi EPA (0.572) menunjukkan bahwa kecenderungan hasil estimasi mendekati sama dengan kecenderungan data monitoring. Sedangkan RMSE dihitung 25,9 di SUF 1 dan 56,9 di SUF 3 lebih besar dari RMSE yang direkomendasikan yaitu 14,2. Analisis grafik menunjukkan estimasi pada SUF 1 lebih kecil dari data monitoring, dengan simpangan sebesar 25,9; dan estimasi pada SUF 3 lebih besar dari data monitoring dengan simpangan 56,9. Hasil-hasil tersebut menyatakan model terbangun cukup baik digunakan mengestimasi dispersi perkotaan dengan menambahkan faktor kalibrasi. Faktor kalibrasi dapat diperkirakan sebesar simpangan, karena kecenderungan pada model dengan data yang hampir sama (nilai korelasi > 0.572). Dengan demikian nilai-nilai estimasi pada SUF 1 dapat dikoreksi dengan menambahkan hasil model dengan simpangan, dan nilai estimasi pada SUF 3 dikoreksi dengan menambahkan nilai simpangan. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.78 dan Gambar 4.79.

Kalibrasi pada hasil estimasi model yang korelasinya cukup baik dengan data monitoring, pada dasarnya cukup dilakukan dengan menggeser data sebesar simpangan rata-rata (RMSE) atau selisih rata-rata kedua seri data. Terlihat pada Gambar 4.78 dan Gambar 4.79, penggeseran data estimasi model sebesar simpangan memberikan hasil yang sangat dekat dengan data monitoring. Korelasi dan simpangan model terkalibrasi terhadap data lapangan menunjukkan 0,69 dan $19,5/12 = 162\%$ di SUF1, serta 0,61 dan $11,9/81=14.7\%$ di SUF3. Dengan demikian model terbangun dapat diaplikasikan untuk memprediksi dispersi pencemar dari sumber-sumber perkotaan dengan hasil yang baik, dengan catatan beberapa titik mungkin perlu dikalibrasi.



Gambar 4.78 Profil konsentrasi NO₂ (model terkalibrasi) dan data (SUF-1), 1-7 Maret 2012 (diolah dari estimasi model terbangun terkalibrasi dan data BLH Kota Surabaya, 2015)



Gambar 4.79 Profil konsentrasi NO₂ (model terkalibrasi) dan data (SUF-3), 1-7 Maret 2012 (diolah dari estimasi model terbangun terkalibrasi dan data BLH Kota Surabaya, 2015)

Dari keseluruhan analisis yang dilakukan dapat dinyatakan bahwa 1) model terbangun dapat memberikan estimasi pada SUF 4 dengan korelasi dan simpangan yang baik, memenuhi standar EPA; 2) model terbangun perlu dikalibrasi sebesar nilai simpangan pada SUF 1 dan 3, dan memberikan hasil yang baik sesuai standar

EPA; dan 3) performa model terbangun untuk estimasi pada SUF 2 dan SUF 5 tidak dapat dianalisis karena tidak tersedianya data pembandingan dari kedua SUF tersebut dalam rentang waktu yang sama dengan SUF yang lain. Secara keseluruhan model terbangun pada penelitian ini memiliki performa yang baik dan konsisten, sehingga dapat dijadikan alternatif penyediaan data kualitas udara Kota Surabaya dan analisis perubahannya. Keluaran lain dari model ini adalah peta distribusi pencemar dengan koordinat riil Kota Surabaya seperti pada Gambar 4.65, sehingga dapat dijadikan dasar analisis dan penilaian status kualitas udara atau kajian lain yang diperlukan.

---o0o---

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Hasil penelitian dan pembahasan menunjukkan:

- Model estimasi kestabilan atmosfer perkotaan dipengaruhi oleh kecepatan angin dan intensitas radiasi. Tinggi pencampuran (*mixing height*) dipengaruhi oleh kekuatan radiasi dan temperatur permukaan. Keduanya telah terintegrasi pada persamaan model distribusi pencemar yang dihasilkan.
- Konstanta kinetika transport dan kinetika reaksi fotokimia pencemar non konservatif di atmosfer dipengaruhi oleh ketersediaan radiasi matahari dan sisa pencemar di atmosfer (terukur di ambien). Konstanta kinetika pencemar NO₂ untuk Kota Surabaya diperoleh sebesar 1.1044 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)²/watt pada musim penghujan dan 0.9466 ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)²/watt pada musim kemarau.
- Model distribusi polutan di atmosfer perkotaan dikembangkan dari persamaan kontinuitas dan konservasi masa-momentum, telah mengakomodasi kestabilan atmosfer sehingga tidak diperlukan perhitungan koefisien difusi berdasar kestabilan atmosfer seperti model Gauss. Aplikasi model terbangun untuk estimasi pencemar udara ambien Kota Surabaya telah memberikan hasil yang cukup dekat dengan data monitoring. Korelasi dan simpangan model dengan data lapangan menunjukkan 0,52 – 0,76 dan simpangan 36 % (SUF 4), 0,69 (SUF1), dan 0,61 (SUF3). Nilai korelasi dekat dengan rekomendasi EPA yaitu 0,572 dan simpangan 72 %.

5.2. Saran

Beberapa hal perlu dilanjutkan (*future work*) untuk memperbaiki model terbangun agar lebih baik, yaitu:

- Memasukkan parameter hujan sebagai salah satu inputan untuk perubahan dispersi/konsentrasi karena adanya proses *flashing*.
- Melakukan monitoring tutupan mendung sesuai kondisi lapangan untuk menggantikan estimasi tutupan mendung (10 – 40 %) random yang

digenerasi secara statistik-matematik pada model yang dihasilkan dalam penelitian ini.

- Menguji model untuk tipe *roughness* selain urban area, untuk meyakinkan bahwa model dihasilkan dapat berlaku general.
- Merumuskan konstanta kestabilan atmosfer dan menguji konsistensinya karena pengaruh temperatur permukaan, kelembaban, dan lainnya.
- Melakukan verifikasi model dengan parameter pencemar konservatif, seperti SO₂, CO₂, dan lainnya

----oo0oo----

DAFTAR PUSTAKA

- Arya, S.P. S. (1981). "Parameterizing the Height of the Stable Atmospheric Boundary layer." *Journal of Applied Meteorology*, vol 20: 1192-1202.
- Assomadi, A. F., Widodo, B., & Hermana, J. (2015). Determination of Clearness Index in Urban Atmosphere Based on the Data Series of Daily Global Radiation Measured. *National Conference of Environmental Technology XII. Surabaya, Indonesia: National Conference of Environmental Technology XII, Environmental Engineering of Institut Teknologi Sepuluh Nopember.*
- Assomadi, A. F., Widodo, B., & Hermana, J. (2016). "The Kinetic Approach of NOx Photoreaction Related to Ground Measurement of Solar Radiation in Estimates of Surface Ozone Concentration", *International Journal of ChemTech Research*, 9 (07): 182-190.
- Baklanov, A., dan A. Kuchin. (2004). "The Mixing Height in Urban Areas: Comparative Study for Copenhagen." *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 4: 2839-2866.
- Baklanov, A., et al. (2006). *Towards estimating the mixing height in urban areas: Recent experimental and modelling results from the COST-715 Action and FUMAPEX project.* Scientific Report 06-06, Copenhagen: DMI Ministry of Transport and Energy.
- Banan, N., Latif, M. T., Juneng, L., & Ahamad, F. (2013). Characteristics of Surface Ozone Concentrations at Stations with Different Backgrounds in the Malaysian Peninsula. *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 1090 - 1106. doi:10.4209/aaqr.2012.09.0259
- Benkley, Carl W, dan Lloyd L. Schulman. (1979). "Estimating Hourly Mixing Depths from Historical Meteorology." *Journal of Applied Meteorology*, vol 18, *American Meteorological Society*: 772-780.
- Bird, R., & Hulstrom, L. R. (1980). *Direct Insolation Models.* Colorado, 1536 Cole Boulevard Golden: Solar Energy Research Institute and US Department of Energy.
- BLH-Surabaya. (2008). *Status Lingkungan Hidup Kota Surabaya.* Surabaya: Badan Lingkungan Hidup Kota Surabaya.

- Boedisantoso, R. (2014). *Pengembangan Metode Perhitungan Emisi CO₂-e dari Limbah Tinja dan Penggunaan Bahan Bakar LPG Aktivitas Rumah Tangga, Disertasi Doktor*. Surabaya: Program Doktor Teknik Lingkungan ITS.
- Brodkey, Robert S, dan Harry C Hershey. (1988). *Transport Phenomena, A Unified Approach*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Buligon, Lidiane, Gervasio A. Degrazia, Charles R.P. Szinvelski, dan Antonio G. Goulart. (2008). "Algebraic Formulation for the Dispersion Parameter in an Unstable Planetary Boundary Layer: Application in the Air Pollution Gaussian Model." *The Open Atmospheric Science Journal* 2: 153-159.
- Burzynski, J., J. Godłowska, A.M. Tomaszewska, dan J. Walczewski. (2011). "The Calculated Mixing Height in Comparison With The Measured Data." *9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. German: Univ German. 24-28.
- Byanju, R. M., Gewali, M. B., & Manandhar, K. (2012). Passive Sampling of Ambient Nitrogen Dioxide Using Local Tubes. *Journal of Environmental Protection*, 3, 177 - 186.
- CAI-Asia. (2009). Clean Air Initiative for Asian Cities (CAI-Asia) Center; Asian Development Bank through RETA 6291: Rolling-out Air Quality in Asia [Sustainable Urban Mobility in Asia (SUMA) Program].
- Cooper, D. I., dan W. E. Eichinger. (1994) "Structure of the Atmosphere in an Urban Planetary Boundary layer from Lidar and Radiosonde Observations." *Journal of Geophysic Res. vol 99: 22937-33948*.
- Daly, Aaron, dan Paolo Zannetti. (2007). "Air Pollution Modeling - An Overview." Dalam *Ambient Air Pollution*, oleh P. Zannetti, D. Al-Ajmi dan S. Al-Rashied, 15-28. The Arab School for Science and Technology (ASST) and The Enviro Comp Institute.
- de Souza, A., Aristone, F., & Sabbah, I. (2015). Modeling the Surface Ozone Concentration in Campo Grande (MS) - Brazil Using Neural Networks. *Natural Science*, 7, 171 - 178. doi:10.4236/ns.2015.74020
- de Souza, A., Aristones, F., & Goncalves, F. V. (2015). Modeling of Surface and Weather Effects Ozone Concentration Using Neural Networks in West Center

- of Brazil. *Climatology and Weather Forecasting*, 3(1). doi:10.4172/2332-2594.1000123
- Derwent, R. G., & Kay, P. A. (1988). Factor Influencing the Ground Level Distribution of Ozone in Europe. *Environmental Pollution*, 55, 191 - 219.
- Dishub Kota Surabaya. (2016). *Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR), LHR tahun 2012*. Dinas Pehubungan Kota Surabaya access: dishub.surabaya.go.id/index.php/post/id/1549.
- Du, C. (2013). Urban Boundary Layer Height Characteristics and Relationship with Particulate Matter Mass Concentrations in Xi'an, Central China. *Journal of Aerosol and Air Quality Research vol 13*, 1598-1607.
- Elbir, Tolga. (2003). "Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey." *Atmospheric Environment International-Europe*, vol 37: 2149-2157.
- Environmental Agency of Surabaya. (2015). *Overview of Measured Values and PSI results*. Surabaya, Indonesia: The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas, Regional Data Center, Accessed in 2015.
- Eresmaa, N., A. Karppinen, S. M. Joffre, J. Rasanen, dan H. Talvitie. (2006). "Mixing Height determination by Ceilometer." *J. Atmospheric Chemistry and Physics vol 6*: 1485-1493.
- Fisher, B., J. Kukkonen, M. Piringer, M. W. Rotach, dan M. Schatzmann. (2006). "Meteorology Applied to Urban Air Pollution Problems: Concepts from COST 715." *Atmospheric Chemistry and Physics* 6: 555-564.
- Fruede, D. (2006). *Spectroscopy, chapter 2: Radiation*.
- Fu, Q. (2003). Radiation (Solar). *Elsevier Science Ltd*, 1859-1863.
- Glickman, T.S. (2000). "Glossary of Meteorology." *Journal of American Meteorological Society*: 855.
- Hashmonay, R., A. Cohen, dan U. Dayan. (1991). "Lidar observations of atmosphere boundary layer in Jerusalem." *Journal of Applied Meteorology vol 30*,: 1228-1236.
- Hermana, J., Wilujeng, S. A., Assomadi, A. F., & Sudibyo. (2013). *Study of Carbon Footprint for Ecoregion pattern in East Java, Indonesia*. Surabaya, Indonesia: Research Report, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Houcque, D., (2005). Introduction to MATLAB for Engineering Student, s.l.: Northwestern University.
- Imron, C., Suhariningsih, Widodo, B., & Yuwono, T. (2013). Numerical Simulation of Fluid Flow Around Circular and I-Shape Cylinder in a Tandem Configuration. *Applied Mathematical Sciences*, 7:114, 5657 - 5666. doi:10.12988/ams.2013.39490
- IPCC. (1997). Revised 1996 IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *Intergovernmental Panel for Climate Change, volume 3 Reference Manual*. aaaa.
- IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol 2, Energy*. (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.) Hayama, Japan: IGES.
- IPCC. (2007). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. *IPCC-TSU NGGIP*. Japan.
- KemenLH-RI. (2012). *Evaluasi Kualitas Udara Perkotaan 2012*. Jakarta: Asdep PPU Sumber Bergerak, Deputi Bidang Pengendalian Pencemaran Udara Kemen LH.
- Kiehl, & Trenberth. (1997). Earth's Annual Gobal Mean Energy Budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 197-208.
- Karppinen, A., J. Kukkonen, T. Elolahde, M. Konttinen, T. Koskentalo, dan E. Rantrakans. (2000). "A modelling system for predicting urban air pollution: model description and applications in the Helsinki metropolitan area." *Atmospheric Environment, vol 34: 3723-3733*.
- KemenLH-RI. (2012). *Evaluasi Kualitas Udara Perkotaan 2012*. Jakarta: Asdep PPU Sumber Bergerak, Deputi Bidang Pengendalian Pencemaran Udara Kemen LH.
- Khandokar, Afsana, Abdullah Mofarrah, dan Tahir Husain. (2010). *Comparison of Upper Air Mixing Height Estimation Methods for Urban Air Pollution Modeling*. St. John's, NL, A1B 3X5 Canada: Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University.

- Kukkonen, J., J. Harkonen, E. Valkonen, A. Karppinen, dan E. Rantrakrans. (1997). "Regulatory Dispersion Modelling in Finland." *Int. Journal of Environment and Pollution* 8 (3-6): 782-788.
- Kusuma, W. P. (2010). *Studi Kontribusi Kegiatan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Surabaya Bagian Barat*. Surabaya: Tugas Akhir: Jurusan Teknik Lingkungan FTSP-ITS.
- LaCasce, J. H. (2013). *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Oslo, Norway: Department for Geosciences University of Oslo P.O. Box 1022 Blindern .
- Langner, J., Engardt, M., Baklanov, A., Christensen, J. H., Gauss, M., Geels, M., . . . Zakey, A. (2012). A Multi-model Study of Impact of Climate Change on Surface Ozone in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 10423 - 10440. doi:10.5194/acp-12-10423-2012
- Lyra, R., A. Druilhet, B. Benech, dan C. Bouka Biona. (1992). "Dynamic Above a Dense Equatorial Rain Forest from the Surface Boundary Layer to the Free Atmosphere." *Journal of Geophysics Res.* vol 97: 12953-12965.
- Macdonald, Robert. (2003). "Theory and Objectives of Air Dispersion Modelling." *Modelling Air Emissions for Compliance MME 474A Wing Engineering*.
- Mahrt, L., J. C. Andre, dan R. C. Heald. (1982). "On the Depth of the Nocturnal Boundary Layer." *Journal of Applied Meteorology*, Vol 21: 90-92.
- Mashuda, & Widodo, B. (2011). *Simulasi Pola Penyebaran Particulate Matter 10 (PM10) di Area Industri PT Semen Gresik di Tuban*. Surabaya, Indonesia: Tesis Program Magister Institut Teknologi Sepuluh Nopember .
- Mathew, T. V. (2014). Fuel Consumption and Emission Studies. In *Lecture note in Traffic Engineering and Management*. NPTEL.
- MathWork, (2008). *MATLAB 7 Getting Started Guide*, 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098: The MathWork, Inc..
- MathWork, (2016). *MATLAB Primer*, 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098: The MathWorks, Inc.
- Middleton, D. R. (2002). "Meteorological Challenges in Urban Air Pollutin." *Clean Air*,: 14-19.
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., . . . William, M. L. (2014). Tropospheric Ozone and Its Precursors from the

- Urban to the Global Scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 14, 606. doi:10.5194/acpd-14-32709-2014
- Nieuwstadt, F.T. M. (1984). "The Turbulent Structure of the Stable, Nocturnal Boundary layer." *Journal of Atmospheric Science*, vol 41: 2202-2216.
- NIWAR - ME Manatu Mo Te Taiao, (2004). Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling, PO Box 10 - 362, Wellington, New Zealand: Ministry for the Environment Manatu Mo Te Taiao
- Okogbue, E. C., Adedokun, J. A., & Holmgren, B. (2009). Review Hourly and Daily Clearness Index and Diffuse Fraction at a Tropical Station, Ile-Ife, Nigeria. *International Journal of Climatology, Royal Meteorology Society*, 29, 1035 - 1047.
- Piringer, Martin, et al. (2011). "The Urban Surface Energy Budget and The Mixing Height: Some Result of Recent European Experiments Stimulated by the COST-Action 715." *9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. German: Univ German. 137-141.
- Pradiptyas, D., Boedisantoso, R., & Assomadi, A. F. (2011). *Analisis Kecukupan Ruang Terbuka Hijau sebagai Penyerap Emisi CO2 di Perkotaan Menggunakan Program Stella (Studi Kasus: Surabaya Utara dan Timur)*, . Surabaya: Tugas Akhir: Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Proyek PCI. (1999). Kursus Pengelolaan Kualitas Udara. In T. P. PCI, *Sesi 7: Pemantauan Kualitas Udara, Catatan Instruktur dan OHP* (pp. 7-9). Jakarta: Proyek PCI-BAPEDAL, Propinsi Jawa Timur, dan AusAID.
- Putut, E., & Widodo, B. (2010). *Simulasi Model Dispersi Polutan Karbon Monoksida di Pintu Masuk Tol* . Surabaya: Tesis Program Magister Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- R Core Team. (2012). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Russel, A., & Dennis, R. (2000). NARSTO critical review of photochemical models and modeling. *Atmospheric Environment* (34), 2283-2294.

- Sartelet, K., Derby, E., Fahey, K., Tombette, M., Roustan, Y., & Sportisse, B. (2007). Simulation of aerosol and related species over Europe with the Polyphemus system. Part I: model-to-data comparison for year 2001. *Atmospheric Environment*.
- Schafer, Klaus, Wagner, P., Emeis, S., Jahn, C., Munkel, C., & Suppan, P. (2012). Mixing Layer Height and Air Pollution Level in Urban Area. *Proc. of SPIE Vol. 8534 853409-1*.
- Seibert, P., F. Beyrich, dan S. E. Gryning. (1978). "Regional Patterns of Mixing Depth and Stability: Sodar Network Measurements for Input Air Quality Models." *Bullatine American Meteorological Society, Vol 59*: 1257-1287.
- Siebert, P., F. Beyrich, S. E. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen, dan Ph. Tercier. (2000). "Review and Intercomparison of Operational Method for the Determination of the Mixing Height." *J. of Atmos. Environ. vol 34 (7)*: 1001-1027.
- Seinfeld, John H, dan Spyros N Pandis. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change*. 2nd edition vol. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc.,
- Shakey, K. (2004). *Passive Sampling of Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide in Ambient Air, Master Thesis*. Chiang Mai: Graduate School Chiang Mai University.
- Sharma, R. K., Chithambarathanu, T., & Elampari, K. (2013). Assesment of Surface Ozone Levels in a Semi-urban Site and Its Predictions Using Neural Network. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3(1), 1527 - 1531. Retrieved from www.ijera.com
- Sofen, E. D., Bowdalo, D., Evans, M. J., Apadula, F., Bonasoni, P., Cupeiro, M., . . . Torseth, K. (2015). Gridded Global Surface Ozone Metrics for Atmospheric Chemistry Model Evaluation. *Earth System Science data Discussion; Open Access*, 8, 603 - 647. doi:10.5194/essdd-8-603-2015
- Sportisse, B. (2008). *Fundamentals in Air Pollution, from Precesses to Modelling*. London, New York: Springer Dordrecht Heidelberg (www.springer.com).

- Sun, Yang, Tao Song, Guiqian Tang, dan Yuesi Wang. (2013). "The vertical distribution of PM_{2.5} and boundary-layer structure during summer haze in Beijing." *Atmospheric Environment* 74: 413-421.
- Tan, E., Sahin, A. D., & Sen, Z. (2001). Atmospheric Clearness Index Evaluatuon by Solar Radiation Sunshine Duration Polygons. Istanbul Turkey: Meteorology Department, Ucak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Istanbul Technical University Energy Group, Maslak 80626.
- Tang, M. J., Cox, R. A., & Kalberer, M. (2014). Compilation and Evaluation of Gas Phase Diffusion Coefficient of Reactive Trace Gases in The Atmosphere: Volume 1 Inorganic Compound. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 9233 - 9247.
- Thibodeaux, L. J. (1996). *Environmental Chemodynamics, Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil* (Second ed.). New York: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
- Utomo, E. B. (2016). Analisis Kemacetan Lalu Lintas di Kota Surabaya (Studi Kasus Titik Kemacetan di Jalan Ahmad Yani, Jalan Wonokromo, dan Jalan Dupak Surabaya Tahun 2014). *Swara Bumi, Volume 3 Nomor 3*, 20-29.
- Utomo, Y. S., Haen, I., & Hoesin, H. (2004). Pemodelan Matematis untuk Analisis Radiasi Surya di Permukaan Bumi Daerah Khatulistiwa (15 LS - 15 LU). *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, ISSN 1411-4216* (pp. I-15-1:I-15-7). Semarang: Jurusan Teknik Kimia Fak Teknik Universitas Diponegoro.
- Widodo, B. (2012). *Mathematical Modeling* (1-st ed.). Surabaya, Indonesia: ITS Press.
- Widodo, B. (2012). The Influence of Hydrodynamics on Pollutan Dispersion in the River. *International Journal of Contemporer Mathematic Sciences*, 7:45, 2229 - 2234.
- Zilitinkevich, S. S. (1972). "On the Determination of the Height of the Ekman Boundary Layer." *Journal of Boundary-Layer Meteorology*, vol 3, 1972: 141-145.

---o0o---

Lampiran 1. Script MATLAB Program Dispersi

L1.1 MPSLS_Peta.m (multi points sources lines sources dan peta, model awal)

```
%% Insert Peta Administratif
img = imread('AdminSby1.jpg');
min_x = 112.59;
max_x = 112.85;
min_y = -7.36;
max_y = -7.19;
imagesc([min_x max_x], [min_y max_y], flipud(img));
set(gca,'ydir','normal');
hold on;
sc = 110447; %skala rata-rata m/degree

%% Konstanta Difusivitas
Dify = 0.001; Difz = 0.001; % difusivitas horizontal dan
vertical (m)
Dy = Dify*1/sc; Dz = Difz*1/sc; % difusifitas dalam deg
lambda = 0.001; % konstanta decay

%% Multi Point Source
%% Data beban emisi (g/s)
Q1 = 10000;Q5 = 10000;Q9 = 10000; % beban emisi (g/s)stack-1,5,9
Q2 = 10000;Q6 = 10000;Q10 = 10000; % beban emisi (g/s) stack-2,6,10
Q3 = 10000;Q7 = 10000;Q11 = 10000; % beban emisi (g/s) stack-3,7,11
Q4 = 10000;Q8 = 10000;Q12 = 10000; % beban emisi (g/s) stack-4,8,12
%% Data teknis stack
stack1 = 100;stack2 = 100;stack3 = 100;stack4 = 100;
stack5 = 100;stack6 = 100;stack7 = 100;stack8 = 100;
stack9 = 100;stack10 = 100;stack11 = 100;stack12 = 100;
receptor = 1.5; % tinggi receptor dalam m
%posisi stack
xs1 = 112.65; ys1 = -7.28;xs5 = 112.77; ys5 = -7.32;xs9 = 112.75; ys9 = -
7.22; % posisi stack 1,5,9
xs2 = 112.655; ys2 = -7.3;xs6 = 112.8; ys6 = -7.3;xs10 = 112.775; ys10 = -
7.26; % posisi stack 2,6,10
xs3 = 112.7; ys3 = -7.32;xs7 = 112.655; ys7 = -7.24;xs11 = 112.62; ys11 =
-7.24; % posisi stack 3,7,11
xs4 = 112.725; ys4 = -7.325;xs8 = 112.725; ys8 = -7.26;xs12 = 112.71; ys12
= -7.255; % posisi stack 4,8,12
%Efektif plume dalam deg
H1 = stack1*1/sc; H2 = stack2*1/sc; H3 = stack3*1/sc; H4 = stack4*1/sc;
H5 = stack5*1/sc; H6 = stack6*1/sc; H7 = stack7*1/sc; H8 = stack8*1/sc;
H9 = stack9*1/sc; H10 = stack10*1/sc; H11 = stack11*1/sc; H12 =
stack12*1/sc;
z = receptor*1/sc; % tinggi receptor deg
[x,y] = meshgrid(linspace(min_x,max_x,1000),linspace(min_y,max_y,1000));
e = ones(size(x));
aa = (90-a)*pi/180; % a = arah angin ke ... dengan acuan utara (N
= 0) searah jarum jam
ma = tan((180-a)*pi/180); % gradient arah angin terhadap
reference (east)
gcont = 2;

%% jarak x dan y dari sumber searah angin
xx1 = (x - xs1)*cos(aa) - (ys1 - y)*sin(aa); yy1 = (y - ys1)*cos(aa) + (xs1
- x)*sin(aa);
xx2 = (x - xs2)*cos(aa) - (ys2 - y)*sin(aa); yy2 = (y - ys2)*cos(aa) + (xs2
- x)*sin(aa);
xx3 = (x - xs3)*cos(aa) - (ys3 - y)*sin(aa); yy3 = (y - ys3)*cos(aa) + (xs3
- x)*sin(aa);
xx4 = (x - xs4)*cos(aa) - (ys4 - y)*sin(aa); yy4 = (y - ys4)*cos(aa) + (xs4
- x)*sin(aa);
```

```

xx5 = (x - xs5)*cos(aa) - (ys5 - y)*sin(aa); yy5 = (y - ys5)*cos(aa) + (xs5
- x)*sin(aa);
xx6 = (x - xs6)*cos(aa) - (ys6 - y)*sin(aa); yy6 = (y - ys6)*cos(aa) + (xs6
- x)*sin(aa);
xx7 = (x - xs7)*cos(aa) - (ys7 - y)*sin(aa); yy7 = (y - ys7)*cos(aa) + (xs7
- x)*sin(aa);
xx8 = (x - xs8)*cos(aa) - (ys8 - y)*sin(aa); yy8 = (y - ys8)*cos(aa) + (xs8
- x)*sin(aa);
xx9 = (x - xs9)*cos(aa) - (ys9 - y)*sin(aa); yy9 = (y - ys9)*cos(aa) + (xs9
- x)*sin(aa);
xx10 = (x - xs10)*cos(aa) - (ys10 - y)*sin(aa); yy10 = (y - ys10)*cos(aa)
+ (xs10 - x)*sin(aa);
xx11 = (x - xs11)*cos(aa) - (ys11 - y)*sin(aa); yy11 = (y - ys11)*cos(aa)
+ (xs11 - x)*sin(aa);
xx12 = (x - xs12)*cos(aa) - (ys12 - y)*sin(aa); yy12 = (y - ys12)*cos(aa)
+ (xs12 - x)*sin(aa);
v = s/sc; % kec angin deg/s
%% Perhitungan konsentrasi Dispersi
c1 = 0.001*Q1*e./(4*pi.*xx1*sqrt(Dy*Dz)*v).*exp(-
v*yy1.*yy1./(4*Dy.*xx1)).*(exp(-v*(z-H1).*(z-H1)*e./(4*Dz.*xx1))+exp(-
v*(z+H1).*(z+H1)*e./(4*Dz.*xx1))).*exp(-lambda.*xx1/v);
c1(isinf(c1))=0; c1(isnan(c1))=0;
c2 = 0.001*Q2*e./(4*pi.*xx2*sqrt(Dy*Dz)*v).*exp(-
v*yy2.*yy2./(4*Dy.*xx2)).*(exp(-v*(z-H2).*(z-H2)*e./(4*Dz.*xx2))+exp(-
v*(z+H2).*(z+H2)*e./(4*Dz.*xx2))).*exp(-lambda.*xx2/v);
c2(isinf(c2))=0; c2(isnan(c2))=0;
...
...
...
c12 = 0.001*Q12*e./(4*pi.*xx12*sqrt(Dy*Dz)*v).*exp(-
v*yy12.*yy12./(4*Dy.*xx12)).*(exp(-v*(z-H12).*(z-H12)*e./(4*Dz.*xx12))+
exp(-v*(z+H12).*(z+H12)*e./(4*Dz.*xx12))).*exp(-lambda.*xx12/v);
c12(isinf(c12))=0; c12(isnan(c12))=0;

%% Multi Line Sources
%% Data Teknis Jalan
x1 = 112.8; y1 = -7.32; x2 = 112.7; y2 = -7.28;
x3 = 112.7; y3 = -7.28; x4 = 112.6; y4 = -7.22;
plot([x1 x2],[y1 y2],'LineStyle','-','LineWidth',.5,'color','r');
plot([x3 x4],[y3 y4],'LineStyle','-','LineWidth',.5,'color','r');
avg_s = 30; tr_vol = 4000; QJ1 = 1000; QJ2 = 1000; HE = 0.4; LJ = 5;
% kec rata-rata (km/jam), kepadatan jalan (kend/jam), beban emisi rata-rata
(g/s)H sbr emisi (m), lebar jalan (m)
L = LJ*1/sc; tr_sp = avg_s*1/sc; Hs = HE*1/sc;
%% jarak receptor dari line source
m1 = (y2 - y1)/(x2 - x1); m2 = (y4 - y3)/(x4 - x3);
k1 = y1 - m1*x1; k2 = y3 - m2*x3;
A1 = atan(m1)*180/pi; A2 = atan(m2)*180/pi;
arah = a-90;
B1 = arah + A1; B2 = arah + A2;
d1 = ((-y+m1*x+k1)/(1+m1^2)^0.5)/(sin(B1.*pi/180)).*1/sc;
d2 = ((-y+m2*x+k2)/(1+m2^2)^0.5)/(sin(B2.*pi/180)).*1/sc;
xe1 = (ma*x - m1*x2 - y + y2)/(ma-m1); ye1 = m1*(xe1-x2)+y2; %titik
potong lintasan angin melewati pengamat dengan jalan1
xe2 = (ma*x - m2*x4 - y + y4)/(ma-m2); ye2 = m2*(xe2-x4)+y4; %titik
potong lintasan angin melewati pengamat dengan jalan1
z = 1.5/sc;
dz = 100*Dz;

%% Dispersi line source
Le1 = abs(y2 - y1); EF1 = 0.5*Le1 - abs(ye1 - 0.5*(y2+y1)); E1=
(EF1>=0).*EF1;
Le2 = abs(y4 - y3); EF2 = 0.5*Le2 - abs(ye2 - 0.5*(y4+y3)); E2=
(EF2>=0).*EF2;

```

```

cJ1 = QJ1*e./(((2*pi)^0.5)*d1.*dz*v).*exp(-v*(z-Hs)*(z-Hs)*e./(4*dz*d1))+exp(-v*(z+Hs)*(z+Hs)*e./(4*dz*d1)).*exp(-lambda*d1./v);
cJ1(isinf(cJ1))=0; cJ1(isnan(cJ1))=0; cLS1 = cJ1.*E1;
cJ2 = QJ2*e./(((2*pi)^0.5)*d2.*dz*v).*exp(-v*(z-Hs)*(z-Hs)*e./(4*dz*d2))+exp(-v*(z+Hs)*(z+Hs)*e./(4*dz*d2)).*exp(-lambda*d2./v);
cJ2(isinf(cJ2))=0; cJ2(isnan(cJ2))=0; cLS2 = cJ2.*E2;

%% Plot Posisi Stack
plot(xs1,ys1,'ok',xs2,ys2,'ok',xs3,ys3,'ok',xs4,ys4,'ok',xs5,ys5,'ok',xs6,ys6,'ok');
plot(xs7,ys7,'ok',xs8,ys8,'ok',xs9,ys9,'ok',xs10,ys10,'ok',xs11,ys11,'ok',xs12,ys12,'ok');

%% Plot Contur dispersi
c = (c1 + c2 + c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11 + c12 + cLS1 + cLS2)./(20000*11047*11047);
contour(x,y,c,40,'Fill','off');
map = [0, 1, 1
       0, 0.5, 1
       0.2, 0.7, 0.6
       1, 0.7, 0.3
       1, 0, 0];
colormap(map); c = colorbar; c.Label.String = 'Konsentrasi Ambien (\mug/m^3)';

%% Plot Angin vektor
[x,y] = meshgrid(linspace(min_x,max_x,10),linspace(min_y,max_y,10));
vel = v*0.00000907;
u = vel*cos((90-a)*pi/180)*ones(size(x));
w = vel*sin((90-a)*pi/180)*ones(size(y));
wind_speed = sqrt(u.^2 + w.^2);
quiver(x,y,u,w,0.1,'b');
axis([112.59 112.85 -7.36 -7.19]);
clc

```

L1.2 PLSAS_Loop1_f.m (points sources lines sources area sources dengan fungsi loop)

```

%% Insert Peta Administratif
img = imread('AdminSby1.jpg');
min_x = xlsread('UPDM_V11','Phys_Data','C31');
max_x = xlsread('UPDM_V11','Phys_Data','C32');
min_y = xlsread('UPDM_V11','Phys_Data','C33');
max_y = xlsread('UPDM_V11','Phys_Data','C34');
imagesc([min_x max_x], [min_y max_y], flipud(img));
set(gca,'ydir','normal');
hold on; sc = 110447; %skala rata-rata m/degree
%% Konstanta Difusivitas hggfvu8
Dify = 200; Difz = 400;

% difusivitas horizontal dan vertical (m2/s)
Dy = Dify*1/(sc^2); Dz = Difz*1/(sc^2); % difusifitas dalam deg

%% 1. Points Sources
%% 1.1. Data beban emisi (g/s)
Q = 1*xlsread('UPDM_V11','PointS','I4:I5'); %input beban (g/s)
%% 1.2. Data teknis stack
stack = xlsread('UPDM_V11','PointS','E4:E5'); % input tinggi efektif stack (m)
receptor = 1.5; % tinggi receptor dalam m
%posisi stack
xs = xlsread('UPDM_V11','PointS','D4:D5'); % input koordinat x stack

```

```

ys = xlsread('UPDM_V11','PointS','C4:C5');           % input koordinat y stack
%Efektif plume dalam deg
z = receptor*1/sc;   % tinggi receptor deg
%% Resolusi (GRID)
[x,y] = meshgrid(linspace(min_x,max_x,grid),linspace(min_y,max_y,grid));
cP = zeros(size(x));
e = ones(size(x));
aa = (90-a)*pi/180;           % a = arah angin ke ... dengan acuan utara (N
= 0) searah jarum jam
%% 1.3. jarak x dan y dari sumber searah angin
v = 1*s/sc;           % kec angin deg/s
%% 1.4. Perhitungan konsentrasi Dispersi
for i=1:length(Q)
    str = ['S-',num2str(i)];
    plot(xs(i),ys(i),'ok');
    text(xs(i), ys(i),str,'color','r');
    H = stack(i)*1/sc;
    xx = (x - xs(i))*cos(aa) - (ys(i) - y)*sin(aa);
    yy = (y - ys(i))*cos(aa) + (xs(i) - x)*sin(aa);
    c1 = (1000*Q(i)/(2*4*pi*xx*sqrt(Dy*Dz))).*exp(-v*yy*y./(4*Dy*xx))*
        (exp(-v*(z-H) *(z-H)/(4*Dz*xx))+exp(-v*(z+H) *(z+H/4*Dz*xx)))
        exp(-lambda*xx/v).*(sc^(-3));
    c1(isinf(c1))=0;
    cP = cP + c1;
    cP(isnan(cP))=0;
end

%% 2. Lines Sources
%% 2.1. Data beban emisi (g/s)
QJ = Factor*xlsread('UPDM_V11','LineS','K4:K125');           %input beban
(g/s)
%% 2.2. LS_Data teknis sumber rata-rata
HE = 0.4;           % input tinggi sumber (m)
Hs = HE*1/sc;           % tinggi dalam deg
%posisi jalan
x1 = xlsread('UPDM_V11','LineS','E4:E125'); % input koordinat x awal jalan
x2 = xlsread('UPDM_V11','LineS','F4:F125'); % input koordinat x akhir
jalan
y1 = xlsread('UPDM_V11','LineS','C4:C125'); % input koordinat y awal jalan
y2 = xlsread('UPDM_V11','LineS','D4:D125'); % input koordinat y awal jalan
%Efektif plume dalam deg
cLS = zeros(size(x));
dz = Dz/1000;
ma = tan((90-a)*pi/180);           % gradient arah angin terhadap
reference (east)
%% 2.3. Perhitungan konsentrasi Dispersi
for j=1:length(QJ)
    str = num2str(j);
    plot([x1(j) x2(j)], [y1(j) y2(j)], 'LineStyle', '-
', 'LineWidth', 1, 'color'...
        , 'm');text((x1(j)+x2(j))/2, (y1(j)+y2(j))/2, str, 'color', 'r');
    m = (y2(j) - y1(j))/(x2(j) - x1(j)) ;
    k = y1(j) - m*x1(j);
    A = atan(m)*180/pi;
    B = (a-90) + A;
    d = ((-y+m*x+k)/(1+m^2)^0.5)/(sin(B.*pi/180));
    xe = (ma*x - m*x2(j) - y + y2(j))./(ma-m);
    ye = m*(xe-x2(j))+y2(j);
    Le = abs(y2(j) - y1(j));
    EF = 0.5*Le - abs(ye - 0.5*(y2(j)+y1(j)));
    E= (EF>=0).*EF; COR=E./E;
    COR(isnan(COR))=0;
    if d==0
        cJ = 1000*(QJ(j)*e./(sqrt(2*pi)*dz)).*sc^(-3);
    else

```

```

        cJ = (1000*QJ(j)/(sqrt(2*pi)*d*dz)) (exp(-v*(z-Hs)*(z-Hs)
/ (4*dz*d)) + exp(-v*(z+Hs)*(z+Hs)/(4*dz*d))) .* exp(-lambda*d./v) * sc^(-3);
    end
    cJ(isinf(cJ))=0; cJ(isnan(cJ))=0; cLS1 = cJ.*COR;
    cLS = cLS + cLS1;
end

%% 3. Area Sources
%% 3.1. Data beban dan teknis ketinggian sumber rata-rata
QAS = xlsread('UPDM_V11','AreaS','I5:I160'); stack = 2; H = stack*1/sc;
% input tinggi stack (m)
xa = xlsread('UPDM_V11','AreaS','E5:E160'); xb =
xlsread('UPDM_V11','AreaS','F5:F160');
ya = xlsread('UPDM_V11','AreaS','C5:C160'); yb =
xlsread('UPDM_V11','AreaS','D5:D160');
%posisi sumber area
[xs1,ys1] = meshgrid(linspace(xa(1),xb(1),9),linspace(ya(1),yb(1),9)); %
input koordinat xy sumber
[xs2,ys2] = meshgrid(linspace(xa(2),xb(2),9),linspace(ya(2),yb(2),9));
...
...
[xs155,ys155] =
meshgrid(linspace(xa(155),xb(155),9),linspace(ya(155),yb(155),9));
[xs156,ys156] =
meshgrid(linspace(xa(156),xb(156),9),linspace(ya(156),yb(156),9));

%Efektif plume dalam deg
cA = zeros(size(x));
e = ones(size(x));
aa = (90-a)*pi/180; % a = arah angin ke ... dengan acuan utara (N
= 0) searah jarum jam
%% 3.2. jarak x dan y dari sumber searah angin
v = 1*s/sc; % kec angin deg/s
%% 3.3. Perhitungan konsentrasi Dispersi Area Source
for i=1:size(xs1)
    for j = 1: size(ys1);
        konf = 1000;
        xx1 = (x - xs1(i,j))*cos(aa) - (ys1(i,j) - y)*sin(aa); yy1 = (y -
ys1(i,j))*cos(aa) + (xs1(i,j) - x)*sin(aa);
        xx2 = (x - xs2(i,j))*cos(aa) - (ys2(i,j) - y)*sin(aa); yy2 = (y -
ys2(i,j))*cos(aa) + (xs2(i,j) - x)*sin(aa);
        ...
        ...
        xx155 = (x - xs155(i,j))*cos(aa) - (ys155(i,j) - y)*sin(aa); yy155 =
(y - ys155(i,j))*cos(aa) + (xs155(i,j) - x)*sin(aa);
        xx156 = (x - xs156(i,j))*cos(aa) - (ys156(i,j) - y)*sin(aa); yy156 =
(y - ys156(i,j))*cos(aa) + (xs156(i,j) - x)*sin(aa);

        c1 = (konf*QAS(1)/(4*pi*xx1*sqrt(Dy*Dz)))*exp(-v*yy1*yy1/(4*Dy*xx1))*
(exp(-v*(z-H)*(z-H)/(4*Dz*xx1))+exp(-v*(z+H)*(z+H)/(4*Dz*xx1)))*
exp(-lambda*xx1/v)*(sc^(-3));
        c2 = (konf*QAS(2)/(4*pi*xx2*sqrt(Dy*Dz)))*exp(-v*yy2*yy2/(4*Dy*xx2))*
(exp(-v*(z-H)*(z-H)/(4*Dz*xx2))+exp(-v*(z+H)*(z+H)/(4*Dz*xx2)))*
exp(-lambda*xx2/v)*(sc^(-3));
        ...
        ...
        c156 = (konf*QAS(156)/(4*pi*xx156*sqrt(Dy*Dz)))*exp(-
v*yy156*yy156/(4*Dy*xx156))* (exp(-v*(z-H)*(z-H)/(4*Dz*xx156))+exp(-
v*(z+H)*(z+H)/(4*Dz*xx156)))*exp(-lambda*xx156/v)*(sc^(-3));

        c1(isinf(c1))=0; c2(isinf(c2))=0;
    ...

```

```

...
...
c155(isinf(c155))=0;c156(isinf(c156))=0;

    cA = cA + c1 + c2 + ...+ c155 + c156;
    cA(isnan(cA))=0;
    end
end
c=cP+cLS+cA;

%% ISPU Location
xI5 = 112.784311; yI5 = -7.28822;
xI4 = 112.716556; yI4 = -7.336167;
xI3 = 112.69515; yI3 = -7.269917;xI3B = 112.712389; yI3B = -7.261028;
xI2 = 112.733453; yI2 = -7.223917;
xI1 = 112.742806; yI1 = -7.261611;
I5=c(round(grid*(yI5-min_y)/(max_y - min_y),0),round(grid*(xI5-
min_x)/(max_x - min_x),0)); D5 = Dt5;
I4=c(round(grid*(yI4-min_y)/(max_y - min_y),0),round(grid*(xI4-
min_x)/(max_x - min_x),0)); D4 = Dt4;
I3=c(round(grid*(yI3-min_y)/(max_y - min_y),0),round(grid*(xI3-
min_x)/(max_x - min_x),0)); D3 = Dt3;
I3B=c(round(grid*(yI3B-min_y)/(max_y - min_y),0),round(grid*(xI3B-
min_x)/(max_x - min_x),0)); D3B = NaN;
I2=c(round(grid*(yI2-min_y)/(max_y - min_y),0),round(grid*(xI2-
min_x)/(max_x - min_x),0)); D2 = Dt2;
I1=c(round(grid*(yI1-min_y)/(max_y - min_y),0),round(grid*(xI1-
min_x)/(max_x - min_x),0)); D1 = Dt1;

%% Plot Pola Dispersi
conts=10:5:150;
ch =contour(x,y,c,conts,'Fill','on'); clabel(ch,[]);
map = [0,0,0
0.122,0,0
0.25,0,0
0.375,0,0
0.5,0,0
0.625,0,0
0.75,0,0
0.875,0,0
1,0,0
1,0.125,0.125
1,0.25,0.25
1,0.375,0.375
1,0.5,0.5
1,0.625,0.625
1,0.75,0.75];
colormap(flipud(map)); c = colorbar; c.Label.String = 'Konsentrasi Ambien
(\mug/m^3)';
%% Insert Peta Administratif

img = imread('AdminSby1.jpg');

imagesc([min_x max_x], [min_y max_y], flipud(img));
set(gca,'ydir','normal');
hold on; alpha(0.4)

%% Plot Angin vektor
[x,y] = meshgrid (linspace(min_x,max_x,10),linspace(min_y,max_y,10));
vel = v*0.00000907;
u = vel*cos((90-a)*pi/180)*ones(size(x));
w = vel*sin((90-a)*pi/180)*ones(size(y));
wind_speed = sqrt(u.^2 + w.^2 );
quiver(x,y,u,w,0.1,'b');
axis([min_x max_x min_y max_y]);

```

```

%% title and SUF Plot
title(['Grid = ',num2str(grid),'; Date ',t, ' WIB; wind velocity ',
num2str(s), ' (m/s), ', ' direction to ', num2str(a), ' (degree from
north), and kinetic constant (\lambda) = ', num2str(lambda),'
(\mug/s)'];...
    ['Concentration (Modeled--Measured) \mug/m^3: SUF1 (' ,num2str(I1),'--
',num2str(D1),' '); SUF2 (' ,num2str(I2),'--',num2str(D2),' '); SUF3
(' ,num2str(I3),'--',num2str(D3),' '); SUF3-B (' ,num2str(I3B),'--
',num2str(D3B),' '); SUF4 (' ,num2str(I4),'--',num2str(D4),' '); SUF5
(' ,num2str(I5),'--',num2str(D5),' ')']);
plot(xI5,yI5,'dk');text(xI5, yI5,' SUF5','color','b');
plot(xI4,yI4,'dk');text(xI4, yI4,' SUF4','color','b');
plot(xI3,yI3,'dk');text(xI3, yI3,' SUF3','color','b');
plot(xI3B,yI3B,'dk');text(xI3B, yI3B,' SUF3-B','color','b');
plot(xI2,yI2,'dk');text(xI2, yI2,' SUF2','color','b');
plot(xI1,yI1,'dk');text(xI1, yI1,' SUF1','color','b')
clc

```

L1.3 tf_PLSAS_Loop1_f.m (timeseries function points sources lines sources area sources dengan fungsi loop)

```

clear;
grid = 200;          % resolusi perhitungan (membagi area perhitungan
menjadi n x n grid)
SUF1 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','B678:B1013');
SUF2 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','C678:C1013');
SUF3 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','D678:D1013');
SUF4 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','F678:F1013');
SUF5 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','G678:G1013');
arah=xlsread('UPDM_V11.xlsx','Phys_Data','AD678:AD1013'); speed
=xlsread('UPDM_V11.xlsx','Phys_Data','AC678:AC1013');
fc = xlsread('UPDM_V11.xlsx','Phys_Data','AI678:AI1013'); lbd =
0.000002*xlsread('UPDM_V11.xlsx','Phys_Data','AJ678:AJ1013');
DateNumber = 734929; formatOut = 'mmm.dd,yyyy HH:MM'; time =
datestr(DateNumber,formatOut);% 1 Jan 2010 = 734139, 2 Jan 2010 = 734140,
1 Agust 2011 = 734716, 1 Mar 2012 = 734929
%% dispersi

for n=1:length(arah);
    Dt1 = SUF1(n);Dt2 = SUF2(n);Dt3 = SUF3(n);Dt4 = SUF4(n);Dt5 = SUF5(n);
    Factor = fc(n); lambda = lbd(n);
    a=arah(n); s=speed(n); t =
datestr(DateNumber+(n)*0.02083333333334,formatOut);cla;
    PLSAS_Loop1_f;
    drawnow
    MOD = [I1 I2 I3 I4 I5];
    my_cell = sprintf('B%s',num2str(n+677));
    A=xlswrite('UPDM_V11.xlsx',MOD,'Result_Model',my_cell);
end

%% Analysis

MOD1=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','B678:B1013');
MOD2=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','C678:C1013');
MOD3=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','D678:D1013');
MOD4=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','E678:E1013');
MOD5=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','F678:F1013');

t = 1:336;          % range max - range min + 1

ts1 = timeseries(SUF1,0.5+0.5*t);ts11 = timeseries(MOD1,0.5+0.5*t);
ts2 = timeseries(SUF2,0.5+0.5*t);ts21 = timeseries(MOD2,0.5+0.5*t);

```

```

ts3 = timeseries(SUF3,0.5+0.5*t);ts31 = timeseries(MOD3,0.5+0.5*t);
ts4 = timeseries(SUF4,0.5+0.5*t);ts41 = timeseries(MOD4,0.5+0.5*t);
ts5 = timeseries(SUF5,0.5+0.5*t);ts51 = timeseries(MOD5,0.5+0.5*t);

ts1.TimeInfo.Units = 'hours';ts11.TimeInfo.Units = 'hours';
ts2.TimeInfo.Units = 'hours';ts21.TimeInfo.Units = 'hours';
ts3.TimeInfo.Units = 'hours';ts31.TimeInfo.Units = 'hours';
ts4.TimeInfo.Units = 'hours';ts41.TimeInfo.Units = 'hours';
ts5.TimeInfo.Units = 'hours';ts51.TimeInfo.Units = 'hours';

ts1.TimeInfo.StartDate = '01-Mar-2012 00:30';ts11.TimeInfo.StartDate =
'01-Mar-2012 00:30'; % Set start date.
ts2.TimeInfo.StartDate = '01-Mar-2012 00:30';ts21.TimeInfo.StartDate =
'01-Mar-2012 00:30'; % sesuaikan dengan DateNumber
ts3.TimeInfo.StartDate = '01-Mar-2012 00:30';ts31.TimeInfo.StartDate =
'01-Mar-2012 00:30';
ts4.TimeInfo.StartDate = '01-Mar-2012 00:30';ts41.TimeInfo.StartDate =
'01-Mar-2012 00:30';
ts5.TimeInfo.StartDate = '01-Mar-2012 00:30';ts51.TimeInfo.StartDate =
'01-Mar-2012 00:30';

ts1.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts11.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
% Set format for display on x-axis.
ts2.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts21.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
ts3.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts31.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
ts4.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts41.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
ts5.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts51.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';

ts1.Time = ts1.Time - ts1.Time(1);ts11.Time = ts11.Time - ts11.Time(1);
% Express time relative to the start date.
ts2.Time = ts2.Time - ts2.Time(1);ts21.Time = ts21.Time - ts21.Time(1);
ts3.Time = ts3.Time - ts3.Time(1);ts31.Time = ts31.Time - ts31.Time(1);
ts4.Time = ts4.Time - ts4.Time(1);ts41.Time = ts41.Time - ts41.Time(1);
ts5.Time = ts5.Time - ts5.Time(1);ts51.Time = ts51.Time - ts51.Time(1);

figure('Name','Simulation Plot SUF1-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts1,'-k'); hold on
plot(ts11,'--b'); grid; title('SUF-1, Data and Model Ploted');
legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horizontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)'); hold off
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF1,MOD1,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF1+b;
plot(SUF1,MOD1,'.k',SUF1,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD1 - SUF1); R = corrcoef(SUF1,MOD1);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF1-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)), ' (MOD = ',num2str(p(1)), ' x SUF1
+ ',num2str(p(2)),')']});

figure('Name','Simulation Plot SUF2-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts2,'-k'); hold on
plot(ts21,'--b'); grid; title('SUF-2, Data and Model
Ploted');legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF2,MOD2,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF2+b;
plot(SUF2,MOD2,'.k',SUF2,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD2 - SUF2); R = corrcoef(SUF2,MOD2);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF2-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)), ' (MOD = ',num2str(p(1)), ' x SUF2
+ ',num2str(p(2)),')']});

```

```

figure('Name','Simulation Plot SUF3-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts3,'-k'); hold on
plot(ts31,'--b'); title('SUF-3, Data and Model
Ploted');legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF3,MOD3,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF3+b;
plot(SUF3,MOD3,'.k',SUF3,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD3 - SUF3); R = corrcoef(SUF3,MOD3);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF3-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),''; R = ',num2str(R(1,2))',' (MOD = ',num2str(p(1)),' x SUF3
+ ',num2str(p(2))',')']});

figure('Name','Simulation Plot SUF4-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts4,'-k'); hold on
plot(ts41,'--b'); title('SUF-4, Data and Model
Ploted');legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF4,MOD4,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF4+b;
plot(SUF4,MOD4,'.k',SUF4,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD4 - SUF4); R = corrcoef(SUF4,MOD4);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF4-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),''; R = ',num2str(R(1,2))',' (MOD = ',num2str(p(1)),' x SUF4
+ ',num2str(p(2))',')']});

figure('Name','Simulation Plot SUF5-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts5,'-k'); hold on
plot(ts51,'--b'); title('SUF-5, Data and Model
Ploted');legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF5,MOD5,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF5+b;
plot(SUF5,MOD5,'.k',SUF5,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD5 - SUF5); R = corrcoef(SUF5,MOD5);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF5-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),''; R = ',num2str(R(1,2))',' (MOD = ',num2str(p(1)),' x SUF5
+ ',num2str(p(2))',')']});

figure('Name','Simulation All Plot Models ','NumberTitle','off')
subplot(2,1,1)
plot(ts51,'-k'); hold on ; plot(ts41,'-r'); hold on ; plot(ts31,'-g');
hold on ; plot(ts21,'-b'); hold on ; plot(ts11,'-y'); hold on
title('SUF All, Model Ploted'); legend('Model in SUF5','Model in
SUF4','Model in SUF3','Model in SUF2','Model in
SUF1','Location','southoutside','Orientation','horizontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
SUF = [SUF1;SUF2;SUF3;SUF4;SUF5]; MOD = [MOD1;MOD2;MOD3;MOD4;MOD5];
subplot(2,1,2)
p = polyfit(SUF,MOD,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF+b;
plot(SUF,MOD,'.k',SUF,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD - SUF); R = corrcoef(SUF,MOD);

```

```

ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations All SUF-MODEL';['RMSE
Total = ',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)), ' (MOD =
',num2str(p(1)), ' x SUF + ',num2str(p(2)),')']});
clear
clc

```

L1.4 Analisis.m (analisis korelasi dan RMSE hasil model dengan data monitoring yang relevan)

```

SUF1 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','B341:B676');
SUF2 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','C341:C676');
SUF3 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','D341:D676');
SUF4 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','F341:F676');
SUF5 = xlsread('UPDM_V11.xlsx','AQ_Data','G341:G676');
MOD1=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','B341:B676');
MOD2=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','C341:C676');
MOD3=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','D341:D676');
MOD4=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','E341:E676');
MOD5=xlsread('UPDM_V11','Result_Model','F341:F676');
t = 1:336; % range max - range min + 1

ts1 = timeseries(SUF1,0.5+0.5*t);ts11 = timeseries(MOD1,0.5+0.5*t);
ts2 = timeseries(SUF2,0.5+0.5*t);ts21 = timeseries(MOD2,0.5+0.5*t);
ts3 = timeseries(SUF3,0.5+0.5*t);ts31 = timeseries(MOD3,0.5+0.5*t);
ts4 = timeseries(SUF4,0.5+0.5*t);ts41 = timeseries(MOD4,0.5+0.5*t);
ts5 = timeseries(SUF5,0.5+0.5*t);ts51 = timeseries(MOD5,0.5+0.5*t);

ts1.TimeInfo.Units = 'hours';ts11.TimeInfo.Units = 'hours';
ts2.TimeInfo.Units = 'hours';ts21.TimeInfo.Units = 'hours';
ts3.TimeInfo.Units = 'hours';ts31.TimeInfo.Units = 'hours';
ts4.TimeInfo.Units = 'hours';ts41.TimeInfo.Units = 'hours';
ts5.TimeInfo.Units = 'hours';ts51.TimeInfo.Units = 'hours';

ts1.TimeInfo.StartDate = '01-Aug-2011 00:30';ts11.TimeInfo.StartDate =
'01-Aug-2011 00:30'; % Set start date. Jan Peb Mar... Aug...
ts2.TimeInfo.StartDate = '01-Aug-2011 00:30';ts21.TimeInfo.StartDate =
'01-Aug-2011 00:30'; % sesuaikan dengan DateNumber
ts3.TimeInfo.StartDate = '01-Aug-2011 00:30';ts31.TimeInfo.StartDate =
'01-Aug-2011 00:30';
ts4.TimeInfo.StartDate = '01-Aug-2011 00:30';ts41.TimeInfo.StartDate =
'01-Aug-2011 00:30';
ts5.TimeInfo.StartDate = '01-Aug-2011 00:30';ts51.TimeInfo.StartDate =
'01-Aug-2011 00:30';

ts1.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts11.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
% Set format for display on x-axis.
ts2.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts21.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
ts3.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts31.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
ts4.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts41.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';
ts5.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';ts51.TimeInfo.Format = 'MMM d HH:mm';

ts1.Time = ts1.Time - ts1.Time(1);ts11.Time = ts11.Time - ts11.Time(1);
% Express time relative to the start date.
ts2.Time = ts2.Time - ts2.Time(1);ts21.Time = ts21.Time - ts21.Time(1);
ts3.Time = ts3.Time - ts3.Time(1);ts31.Time = ts31.Time - ts31.Time(1);
ts4.Time = ts4.Time - ts4.Time(1);ts41.Time = ts41.Time - ts41.Time(1);
ts5.Time = ts5.Time - ts5.Time(1);ts51.Time = ts51.Time - ts51.Time(1);

figure('Name','Simulation Plot SUF1-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts1,'-k'); hold on

```

```

plot(ts11,'--b'); grid; title('SUF-1, Data and Model Ploted');
legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horizontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)'); hold off
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF1,MOD1,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF1+b;
plot(SUF1,MOD1,'.k',SUF1,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD1 - SUF1); R = corrcoef(SUF1,MOD1);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF1-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)),' (MOD = ',num2str(p(1)),' x SUF1
+ ',num2str(p(2)),')']});

figure('Name','Simulation Plot SUF2-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts2,'-k'); hold on
plot(ts21,'--b'); grid; title('SUF-2, Data and Model
Ploted');legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF2,MOD2,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF2+b;
plot(SUF2,MOD2,'.k',SUF2,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD2 - SUF2); R = corrcoef(SUF2,MOD2);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF2-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)),' (MOD = ',num2str(p(1)),' x SUF2
+ ',num2str(p(2)),')']});

figure('Name','Simulation Plot SUF3-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts3,'-k'); hold on
plot(ts31,'--b'); title('SUF-3, Data and Model
Ploted');legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF3,MOD3,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF3+b;
plot(SUF3,MOD3,'.k',SUF3,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD3 - SUF3); R = corrcoef(SUF3,MOD3);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF3-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)),' (MOD = ',num2str(p(1)),' x SUF3
+ ',num2str(p(2)),')']});

figure('Name','Simulation Plot SUF4-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts4,'-k'); hold on
plot(ts41,'--b'); title('SUF-4, Data and Model
Ploted');legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF4,MOD4,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF4+b;
plot(SUF4,MOD4,'.k',SUF4,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD4 - SUF4); R = corrcoef(SUF4,MOD4);
ylabel('model'); xlabel('data');title({'Correlations SUF4-MODEL';['RMSE =
',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)),' (MOD = ',num2str(p(1)),' x SUF4
+ ',num2str(p(2)),')']});

figure('Name','Simulation Plot SUF5-MOD ','NumberTitle','off')
subplot(2,2,[1,2])
plot(ts5,'-k'); hold on

```

```

plot(ts51,'--b'); title('SUF-5, Data and Model
Ploted'); legend('data','model','Location','northeast','Orientation','horiz
ontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
subplot(2,2,3)
p = polyfit(SUF5,MOD5,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF5+b;
plot(SUF5,MOD5,'.k',SUF5,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD5 - SUF5); R = corrcoef(SUF5,MOD5);
ylabel('model'); xlabel('data'); title({'Correlations SUF5-MODEL'; ['RMSE =
',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)), ' (MOD = ',num2str(p(1)), ' x SUF5
+ ',num2str(p(2)), ')]});

figure('Name','Simulation All Plot Models ','NumberTitle','off')
subplot(2,1,1)
plot(ts51,'-k'); hold on ; plot(ts41,'-r'); hold on ; plot(ts31,'-g');
hold on ; plot(ts21,'-b'); hold on ; plot(ts11,'-y'); hold on
title('SUF All, Model Ploted'); legend('Model in SUF5','Model in
SUF4','Model in SUF3','Model in SUF2','Model in
SUF1','Location','southoutside','Orientation','horizontal');
ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)');
SUF = [SUF1;SUF2;SUF3;SUF4;SUF5]; MOD = [MOD1;MOD2;MOD3;MOD4;MOD5];
subplot(2,1,2)
p = polyfit(SUF,MOD,1); a = p(1); b = p(2); yMOD = a*SUF+b;
plot(SUF,MOD,'.k',SUF,yMOD); grid; legend('SUF-MOD','L-
Regression','Location','southeast');
rmse = rms(MOD - SUF); R = corrcoef(SUF,MOD);
ylabel('model'); xlabel('data'); title({'Correlations All SUF-MODEL'; ['RMSE
Total = ',num2str(rmse),'; R = ',num2str(R(1,2)), ' (MOD =
',num2str(p(1)), ' x SUF + ',num2str(p(2)), ')]});
clear
clc

```

L1.5 tf_PLSAS_gridverification.m (script untuk verifikasi dan menentukan grid optimum dalam model)

```

clear;
res = xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','A2:A21'); % resolusi
perhitungan (membagi area perhitungan menjadi n x n grid)
SUF1 = xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','B2:B21');
SUF2 = xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','C2:C21');
SUF3 = xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','D2:D21');
SUF4 = xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','E2:E21');
SUF5 = xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','F2:F21');
arah=82; speed =1.3;
fc = 1.661; lbd = 0.000002*43.34131;
DateNumber = 734139; formatOut = 'mmm.dd,yyyy HH:MM'; time =
datestr(DateNumber,formatOut);
%% dispersi

for n=1:length(res);
    grid = res(n);
    Dt1 = SUF1(n);Dt2 = SUF2(n);Dt3 = SUF3(n);Dt4 = SUF4(n);Dt5 = SUF5(n);
    Factor = fc; lambda = lbd;
    a=arah; s=speed; t =
datestr(DateNumber+33*0.02083333333334,formatOut);cla;
    PLSAS_Loop1_f;
    drawnow
    MOD = [I1 I2 I3 I4 I5];
    my_cell = sprintf('G%s',num2str(n+1));
    A=xlswrite('Verifikasi.xlsx',MOD,'GRID',my_cell);
end

```

```

%% Analysis
MOD4=xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','J2:J21');
res2 = res;
t_iterasi = xlsread('Verifikasi.xlsx','GRID','L2:L21');
DELTA = sqrt((SUF4 - MOD4).^2);
figure('Name','Optimation of grid analysis for SUF1-MOD
','NumberTitle','off')

p=plot(res,SUF4,'-*k',res,MOD4,'-or',res,DELTA,'--b'); title('SUF-4, Data
and Model Ploted Grid Optimation'); legend('data','model','delta mod-
data','Location','northeast','Orientation','horizontal');
xlabel ('grid number'); ylabel('[NOx]-ambient (\mug/m^3)'); p(1).LineWidth
= 1.5;p(2).LineWidth = 1.5;p(3).LineWidth = 1.5;

ax1 = gca; % current axes

ax1_pos = ax1.Position; % position of first axes
ax2 = axes('Position',ax1_pos,...
'XAxisLocation','bottom',...
'YAxisLocation','right',...
'Color','none');
ylabel('waktu iterasi (s)');
q=line(res2,t_iterasi,'Parent',ax2,'Color','b');q(1).LineWidth =
1.5;legend('t-iterasi(s)','Location','east','Orientation','horizontal');
clc

```


Lampiran 2 Penentuan beban emisi ekivalent untuk sumber emisi transportasi (*line sources*), studi kasus Kota Surabaya

Dalam aplikasi model terbangun *time series* dari sumber emisi multi garis (*multi line sources emission*), perubahan pola dispersi disebabkan oleh tiga parameter utama yaitu:

1. Arah dan kecepatan angin. Parameter ini menentukan arah dispersi dan distribusi pencemar.
2. Ketersediaan radiasi matahari (intensitas radiasi, GRAD), mempengaruhi konstanta kinetika reaksi fotokimia untuk pencemar *non conservative* di atmosfer.
3. Beban emisi tiap sumber garis, menentukan besar konsentrasi ambient pada wilayah terpengaruh (*area dispersi*) dari tiap sumber atau akumulasi dengan sumber lain.

GRAD serta arah dan kecepatan angin, dapat diinputkan langsung ke model dari data monitoring harian (atau sesuai waktu yang dimodelkan) di tiap SUF yang berjalan. Nilai-nilai dari tiap SUF ini dapat dimasukkan secara individu yang dianggap mewakili atau rata-rata dari semua SUF, untuk model aliran fluida yang dianggap homogen. Sedangkan beban emisi tiap sumber garis tidak ada data monitoring yang dapat digunakan. Metode pengukuran beban emisi sumber garis belum ada. Maka untuk memenuhi inputan model terbangun, harus dimasukkan nilai-nilai estimasi berdasarkan data-data lalu lintas harian kota, penggunaan bahan bakar, faktor emisi bahan bakar atau kendaraan.

Secara prinsip beban emisi dari sumber garis dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar yang digunakan di sektor transportasi pada kisaran waktu dan panjang jalan tertentu. Dengan demikian beban emisi spesifik ini dapat dinyatakan dalam g/s.m. Jika panjang jalan dinyatakan terbatas (*finite line source*), maka beban emisi rata-rata sepanjang jalan dapat dinyatakan dalam satuan g/s. Penggunaan bahan bakar pada sektor ini ditentukan oleh:

1. Jenis dan jumlah kendaraan yang beroperasi pada waktu yang spesifik, kedua parameter ini dapat dinyatakan dalam satuan ekivalen yang berlaku umum yaitu satuan mobil penumpang (*smp*) atau *passenger vehicle unit (pvu)*
2. Jenis bahan bakar, solar atau premium
3. Kondisi kepadatan lalu lintas, menentukan kecepatan rata-rata melintas pada jalan.

Langkah-langkah untuk mengestimasi beban emisi dari sumber garis adalah sebagai berikut:

L.2.1. Penentuan volume trafik rata-rata jalan di Surabaya

Volume trafik rata-rata jalan di Surabaya menggambarkan kepadatan lalu lintas secara umum. Nilai-nilai volume trafik ini dapat diperoleh dari publikasi trafik oleh dishub kota Surabaya atau penelitian-penelitian lain yang sejenis. Publikasi ini biasanya didasarkan pada hasil *counting* lalu lintas atau survey lapangan. Beberapa data resume volume trafik di Kota Surabaya dapat dilihat pada Tabel L2.1 dan Tabel L2.2.

Tabel L2.1. Volume traffic berdasarkan jenis atau kelas jalan (sumber: hasil penelitian LPPUPI-ITS 2010 - 2013)

Jenis Jalan	Volume traffic		Referensi
High Way (Tol)			Pradiptyas, 2011; Kusuma, 2010; Hermana, dkk., 2013
Primary Artery	4074	Average Traffic	
Scondary Artery	3000	Volume	
Primary Collector	2015	(pvu/15 minute);	
Scondary Collector	2548	approx.	
Local	504		
Faltor Emisi Spesifik	0.000152	(g NO ₂ /smp.s)	IPCC, 2010; Kusuma, 2010, Pradiptyas, dkk, 2011

Tabel L2.2. Volume trafik tahun 2011 rata-rata tiap ruas jalan (Dishub, 2016)

Identitas Ruas Jalan	Kelas Jalan	Vol traffic rata-rata (smp/jam)	speed average (km/jam)	normalized average load (g/s)
Jl. A Yani	Primary Artery	14533	40	82.89
Jl. Wonokromo	Primary Artery	22657	30	144.74
Jl. Raya Darmo	Primary Artery	15125	40	85.56
Jl. Basuki Rahmat -Tunjungan	Scondary Artery	8668	40	49.44
Jl. Jend Sudirman - Urip Sumoharjo	Scondary Artery	10331	50	51.86
Jl. Diponegoro	Primary Artery	8159	50	40.95
Jl. Kedungdoro - Blauran - Bubutan	Scondary Artery	5825	30	37.22
Jl. Gemblongan - Veteran	Scondary Artery	5119	30	32.70
Jl. Indrapura	Scondary Artery	3492	50	15.93
dst	dst	dst	dst	dst

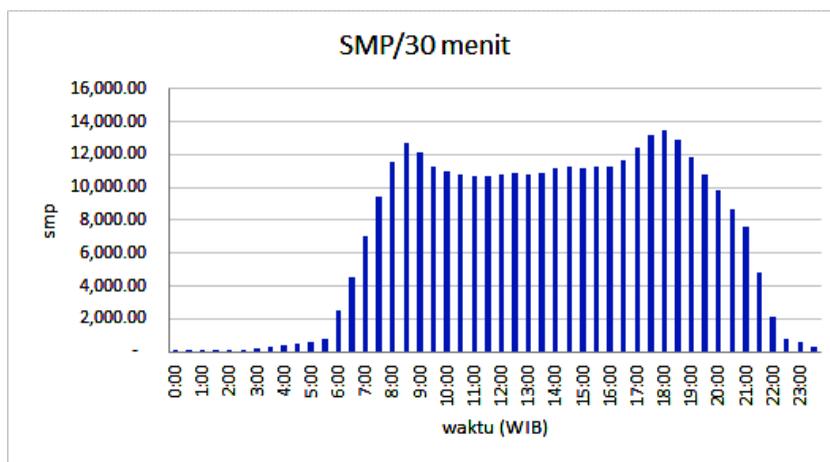
L.2.2. Penentuan faktor pengali beban emisi berdasar waktu

a. Faktor harian (F_h). Faktor ini ditentukan berdasar perubahan volume trafik tiap 30 menit dalam sehari, sehingga faktor ini berubah setiap 30 menit. Perhitungan faktor harian ini menggunakan acuan data rata-rata volume trafik (VT_{rt}), dan

ditetapkan dengan nilai faktor = 1. Pada volume trafik waktu tertentu (VT_t) nilai faktor harian (F_h) ini ditetapkan sebagai berikut:

$$F_h = \frac{VT_t}{VT_{rt}} \times 1$$

Contoh berikut adalah perhitungan faktor harian (F_h) untuk Kota Surabaya berdasarkan rekap hasil survey Dishub Kota Surabaya (pukul 05.00 – 21.00), dan ekstrapolasi data untuk 21.00 – 05.00 dengan asumsi minimum volume trafik pada pukul 24.00 – 01.00 WIB. Perubahan volume trafik dihitung tiap 30 menit ditampilkan pada Gambar L2.1 berikut:



Gambar L2.1 Perubahan volume trafik harian rata-rata Kota Surabaya diolah dari data dishub dan ekstrapolasi data.

Berdasarkan data yang dinyatakan pada Gambar L2.1, rata-rata trafik terhitung adalah 7032 smp/30 menit. Sehingga pada $VT_{rt} = 7032$ nilai F_h ditetapkan = 1. Untuk sebagian waktu-waktu yang lain dihitung sebagai berikut:

- VT_{max} , pada saat volume trafik maksimum, yaitu sekitar pukul 08.30 dan 18.00 WIB, nilai VT adalah 12718 dan 13448, maka nilai F_h masing-masing adalah:

$$F_h = \frac{12718}{7032} \times 1 = 1.81$$

$$F_h = \frac{12718}{7032} \times 1 = 1.91$$

- VT_{min} , pada saat volume trafik minimum, yaitu sekitar pukul 01.00 nilai VT adalah 27, maka nilai F_h adalah:

$$F_h = \frac{27}{7032} \times 1 = 0.004$$

Perhitungan faktor harian lengkap untuk satu hari adalah seperti pada Tabel L2.3 berikut:

Tabel L2.3 Nilai faktor harian (F_h) beban emisi transportasi Kota Surabaya

waktu	VT (smp/30 menit)	Fh	waktu	VT (smp/30 menit)	Fh
0:00	111.39	0.02	12:00	10,811.59	1.54
0:30	46.41	0.01	12:30	10,838.58	1.54
1:00	27.85	0.00	13:00	10,781.25	1.53
1:30	18.57	0.00	13:30	10,895.23	1.55
2:00	46.41	0.01	14:00	11,204.88	1.59
2:30	111.39	0.02	14:30	11,249.08	1.60
3:00	174.89	0.02	15:00	11,155.79	1.59
3:30	252.49	0.04	15:30	11,213.11	1.59
4:00	410.30	0.06	16:00	11,295.17	1.61
4:30	482.71	0.07	16:30	11,676.71	1.66
5:00	556.97	0.08	17:00	12,457.11	1.77
5:30	798.25	0.11	17:30	13,197.65	1.88
6:00	2,493.18	0.35	18:00	13,447.57	1.91
6:30	4,509.58	0.64	18:30	12,852.46	1.83
7:00	7,020.75	1.00	19:00	11,829.43	1.68
7:30	9,417.39	1.34	19:30	10,817.06	1.54
8:00	11,576.06	1.65	20:00	9,785.65	1.39
8:30	12,717.59	1.81	20:30	8,629.45	1.23
9:00	12,144.76	1.73	21:00	7,587.65	1.08
9:30	11,298.46	1.61	21:30	4,781.00	0.68
10:00	10,972.78	1.56	22:00	2,124.54	0.30
10:30	10,815.59	1.54	22:30	742.62	0.11
11:00	10,638.25	1.51	23:30	556.97	0.08
11:30	10,642.90	1.51	0:30	297.05	0.04
rata-rata volume trafik = 7031.51 smp/30 menit					

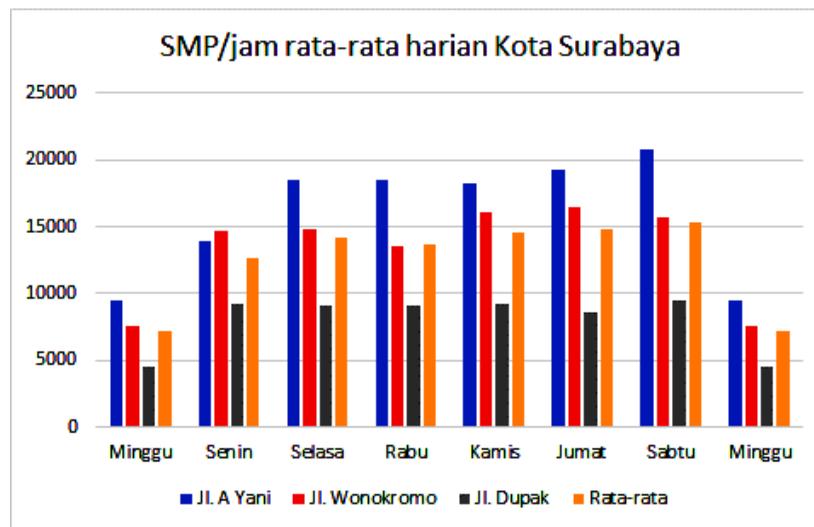
b. Faktor mingguan (F_m). Secara prinsip penentuan faktor mingguan ini sama dengan penentuan faktor harian, dengan kisaran waktu yang diperpanjang menjadi rata-rata volume trafik harian dalam seminggu. Perhitungan faktor mingguan ini menggunakan acuan data rata-rata volume trafik (VT_{rtm}), dan ditetapkan dengan nilai faktor = 1. Pada volume trafik hari tertentu (VT_{th}) nilai faktor mingguan (F_m) ini ditetapkan sebagai berikut:

$$F_m = \frac{VT_{th}}{VT_{rtm}} \times 1$$

Contoh berikut adalah perhitungan faktor mingguan (F_m) untuk Kota Surabaya berdasarkan rekap hasil survey penelitian terdahulu Kota Surabaya. Perubahan volume trafik dihitung harian dan ditampilkan pada Gambar L2.2 didasarkan pada Tabel L2.4. Volume trafik pada hari minggu diasumsikan separo dari rata-rata lalu-lintas harian.

Tabel L2.4 Lalu-lintas rata-rata mingguan di Surabaya (Utomo, 2016)

Hari	Lalu-lintas Harian rata-rata (smp/jam)		
	A. Yani	Wonokromo	Dupak
Senin	13940	14674	9206
Selasa	18432	14867	9050
Rabu	18461	13596	9082
Kamis	18237	16081	9203
Jumat	19266	16496	8645
Sabtu	20719	15710	9489
Rata-rata	19060	15237	9112



Gambar L2.2 Perubahan volume trafik mingguan rata-rata Kota Surabaya diolah dari Utomo, 2016 dan ekstrapolasi data.

Berdasarkan data yang dinyatakan pada Gambar L2.2, rata-rata trafik terhitung adalah 14175 smp/jam. Sehingga pada $VT_{rm} = 14175$ nilai F_m ditetapkan = 1. Untuk sebagian waktu-waktu yang lain dihitung sebagai berikut:

- VT_{max} , pada saat volume trafik maksimum, yaitu pada hari Sabtu nilai VT rata-rata adalah 15306, maka nilai F_m adalah:

$$F_m = \frac{15306}{14175} \times 1 = 1.08$$

- VT_{min} , pada saat volume trafik minimum, yaitu hari minggu nilai VT rata-rata adalah 7235, maka nilai F_h adalah:

$$F_h = \frac{7235}{14175} \times 1 = 0.51$$

Perhitungan faktor mingguan lengkap adalah seperti pada Tabel L2.5 berikut:

Tabel L2.5 Nilai faktor mingguan (F_h) beban emisi transportasi Kota Surabaya

Hari	VT rerata (smp/jam)	Fm
Minggu	7235	0.510386
Senin	12607	0.889345
Selasa	14116	0.995846
Rabu	13713	0.967392
Kamis	14507	1.023405
Jumat	14802	1.04424
Sabtu	15306	1.079771
Rata-rata	14175	1

c. faktor total (F_T). faktor total diperoleh dari hasil perkalian faktor harian (F_h) dan faktor mingguan (F_m). Dengan demikian nilai F dihitung:

$$F_T = F_h \times F_m$$

Contoh hasil perhitungan nilai faktor total untuk transportasi adalah seperti pada Tabel L2.6.

Senin							
waktu	Fh	Fm	Ftotal	waktu	Fh	Fm	Ftotal
00:00	0.02	0.889	0.01778	12:00	1.54	0.889	1.36906
00:30	0.01	0.889	0.00889	12:30	1.54	0.889	1.36906
01:00	0	0.889	0	13:00	1.53	0.889	1.36017
01:30	0	0.889	0	13:30	1.55	0.889	1.37795
02:00	0.01	0.889	0.00889	14:00	1.59	0.889	1.41351
02:30	0.02	0.889	0.01778	14:30	1.6	0.889	1.4224
03:00	0.02	0.889	0.01778	15:00	1.59	0.889	1.41351
03:30	0.04	0.889	0.03556	15:30	1.59	0.889	1.41351
04:00	0.06	0.889	0.05334	16:00	1.61	0.889	1.43129
04:30	0.07	0.889	0.06223	16:30	1.66	0.889	1.47574
05:00	0.08	0.889	0.07112	17:00	1.77	0.889	1.57353
05:30	0.11	0.889	0.09779	17:30	1.88	0.889	1.67132
06:00	0.35	0.889	0.31115	18:00	1.91	0.889	1.69799
06:30	0.64	0.889	0.56896	18:30	1.83	0.889	1.62687
07:00	1	0.889	0.889	19:00	1.68	0.889	1.49352
07:30	1.34	0.889	1.19126	19:30	1.54	0.889	1.36906
08:00	1.65	0.889	1.46685	20:00	1.39	0.889	1.23571
08:30	1.81	0.889	1.60909	20:30	1.23	0.889	1.09347
09:00	1.73	0.889	1.53797	21:00	1.08	0.889	0.96012
09:30	1.61	0.889	1.43129	21:30	0.68	0.889	0.60452
10:00	1.56	0.889	1.38684	22:00	0.3	0.889	0.2667

10:30	1.54	0.889	1.36906	22:30	0.11	0.889	0.09779
11:00	1.51	0.889	1.34239	23:30	0.08	0.889	0.07112
11:30	1.51	0.889	1.34239	00:30	0.04	0.889	0.03556

selasa

waktu	Fh	Fm	Ftotal	waktu	Fh	Fm	Ftotal
00:00	0.02	0.995	0.0199	12:00	1.54	0.995	1.5323
00:30	0.01	0.995	0.00995	12:30	1.54	0.995	1.5323
01:00	0	0.995	0	13:00	1.53	0.995	1.52235
01:30	0	0.995	0	13:30	1.55	0.995	1.54225
02:00	0.01	0.995	0.00995	14:00	1.59	0.995	1.58205
02:30	0.02	0.995	0.0199	14:30	1.6	0.995	1.592
03:00	0.02	0.995	0.0199	15:00	1.59	0.995	1.58205
03:30	0.04	0.995	0.0398	15:30	1.59	0.995	1.58205
04:00	0.06	0.995	0.0597	16:00	1.61	0.995	1.60195
04:30	0.07	0.995	0.06965	16:30	1.66	0.995	1.6517
05:00	0.08	0.995	0.0796	17:00	1.77	0.995	1.76115
05:30	0.11	0.995	0.10945	17:30	1.88	0.995	1.8706
06:00	0.35	0.995	0.34825	18:00	1.91	0.995	1.90045
06:30	0.64	0.995	0.6368	18:30	1.83	0.995	1.82085
07:00	1	0.995	0.995	19:00	1.68	0.995	1.6716
07:30	1.34	0.995	1.3333	19:30	1.54	0.995	1.5323
08:00	1.65	0.995	1.64175	20:00	1.39	0.995	1.38305
08:30	1.81	0.995	1.80095	20:30	1.23	0.995	1.22385
09:00	1.73	0.995	1.72135	21:00	1.08	0.995	1.0746
09:30	1.61	0.995	1.60195	21:30	0.68	0.995	0.6766
10:00	1.56	0.995	1.5522	22:00	0.3	0.995	0.2985
10:30	1.54	0.995	1.5323	22:30	0.11	0.995	0.10945
11:00	1.51	0.995	1.50245	23:30	0.08	0.995	0.0796
11:30	1.51	0.995	1.50245	00:30	0.04	0.995	0.0398

jumat

waktu	Fh	Fm	Ftotal	waktu	Fh	Fm	Ftotal
00:00	0.02	1.044	0.02088	12:00	1.54	1.044	1.60776
00:30	0.01	1.044	0.01044	12:30	1.54	1.044	1.60776
01:00	0	1.044	0	13:00	1.53	1.044	1.59732
01:30	0	1.044	0	13:30	1.55	1.044	1.6182
02:00	0.01	1.044	0.01044	14:00	1.59	1.044	1.65996
02:30	0.02	1.044	0.02088	14:30	1.6	1.044	1.6704
03:00	0.02	1.044	0.02088	15:00	1.59	1.044	1.65996
03:30	0.04	1.044	0.04176	15:30	1.59	1.044	1.65996
04:00	0.06	1.044	0.06264	16:00	1.61	1.044	1.68084
04:30	0.07	1.044	0.07308	16:30	1.66	1.044	1.73304
05:00	0.08	1.044	0.08352	17:00	1.77	1.044	1.84788
05:30	0.11	1.044	0.11484	17:30	1.88	1.044	1.96272

06:00	0.35	1.044	0.3654	18:00	1.91	1.044	1.99404
06:30	0.64	1.044	0.66816	18:30	1.83	1.044	1.91052
07:00	1	1.044	1.044	19:00	1.68	1.044	1.75392
07:30	1.34	1.044	1.39896	19:30	1.54	1.044	1.60776
08:00	1.65	1.044	1.7226	20:00	1.39	1.044	1.45116
08:30	1.81	1.044	1.88964	20:30	1.23	1.044	1.28412
09:00	1.73	1.044	1.80612	21:00	1.08	1.044	1.12752
09:30	1.61	1.044	1.68084	21:30	0.68	1.044	0.70992
10:00	1.56	1.044	1.62864	22:00	0.3	1.044	0.3132
10:30	1.54	1.044	1.60776	22:30	0.11	1.044	0.11484
11:00	1.51	1.044	1.57644	23:30	0.08	1.044	0.08352
11:30	1.51	1.044	1.57644	00:30	0.04	1.044	0.04176

L.2.3. Penentuan beban emisi sumber transportasi

Menggunakan prinsip TIER 1 dalam IPCC, penentuan beban emisi didasarkan pada estimasi rata-rata aktivitas dan faktor emisi dari sumber yang telah dipublikasikan. Aktivitas transportasi diperkirakan berdasarkan data rata-rata volume trafik dikalikan dengan faktor total yang dihasilkan pada L2.2 pada kecepatan asuntif rata-rata pada tiap badan jalan yang distudi. Dengan demikian beban emisi setiap saat (pada kecepatan rata-rata sekitar 50 – 60 km/jam) dihitung dengan formula:

$$Q = VT \times FE$$

Sebagai contoh untuk Jalan A Yani, dengan rata-rata volume trafik (VT) = 14533 smp, dan FE untuk NO_x = 0.000152104 g NO_x/smp.s; maka beban emisi untuk ruas jalan tersebut (dalam asumsi waktu tempuh dalam ruas jalan rata-rata 30 menit = 1800 s) adalah:

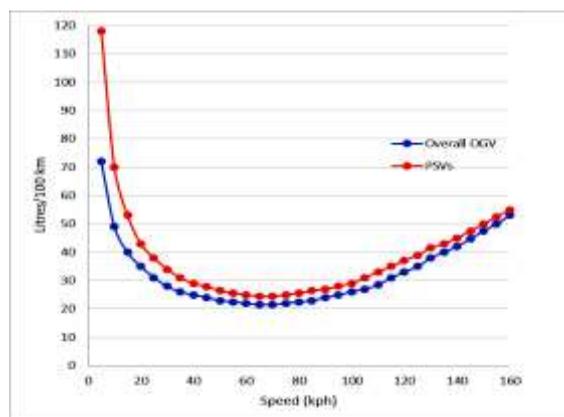
$$Q_r = 14533 \frac{\text{smp}}{\text{jam}} \times \frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ s}} \times 0.000152104 \frac{\text{g NO}_x}{\text{smp.s}} \times 1800 \text{ s} = 11.05 \frac{\text{g NO}_x}{\text{s}}$$

L.2.4. Koreksi beban emisi sumber transportasi dengan perubahan kecepatan rata-rata dan faktor kalibrasi.

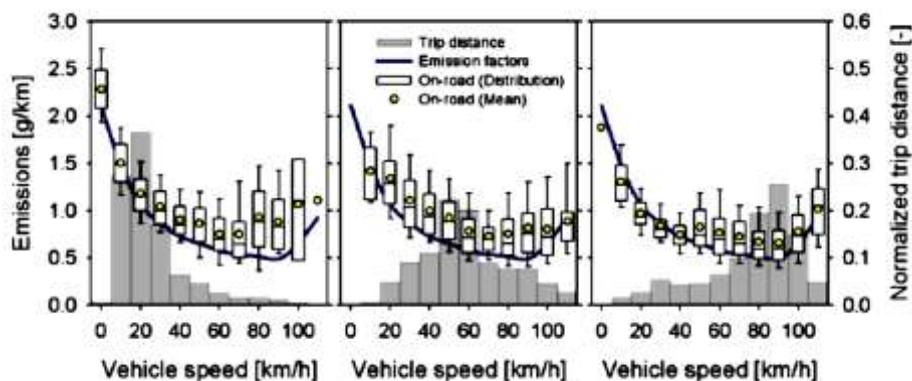
Faktor emisi diperkirakan dari nilai faktor emisi (FE) rata-rata dengan faktor koreksi yang diperoleh dari hubungan konsumsi bahan bakar atau faktor emisi dengan kecepatan rata-rata. Pola hubungan konsumsi bahan bakar dengan kecepatan rata-rata kendaraan menunjukkan konsumsi yang sangat tinggi pada kecepatan rendah dan konsumsi minimum pada kecepatan sedang 60 – 70 km/jam (Mathew, 2014). Untuk kendaraan berat Mathew, 2004 juga menyatakan profil konsumsi bahan bakar dihubungkan dengan kecepatan rata-rata seperti pada Gambar L2.3.

Sedangkan profil perubahan faktor emisi karena perubahan kecepatan operasional kendaraan pada medan yang datar (Eom, Park, & Baik, 2015) menunjukkan pola yang mirip dengan profil konsumsi bahan bakarnya. Profil emisi ini dapat dilihat pada Gambar L2.4.

Faktor kalibrasi diperlukan untuk mendapatkan nilai yang dekat antara model dengan kondisi riil di lapangan. Faktor kalibrasi ini dapat diterapkan jika hasil model mempunyai korelasi yang baik dengan data lapangan. Sehingga faktor kalibrasi ini secara prinsip memberikan bobot (*adjusting*) dengan angka yang konsisten sehingga hasil model dekat dengan data lapangan. Faktor kalibrasi ini juga mengakomodasi adanya kondisi-kondisi lapangan yang sulit digambarkan dalam model, seperti frekuensi pengereman dan tarikan gas, adanya pemberhentian kendaraan, adanya kemacetan, dan sebagainya.



Gambar L2.3 Pola perubahan konsumsi bahan bakar dengan variasi kecepatan rata-rata kendaraan (Mathew, 2014)



Gambar L2.4. Pola perubahan faktor emisi NOx dari kendaraan dengan variasi kecepatan rata-rata (Eom, Park, & Baik, 2015)

Berdasarkan profil yang ditunjukkan pada gambar L2.3 dan L2.4 maka koreksi terhadap beban emisi dari kegiatan transportasi harus dilakukan. Nilai faktor koreksi ini disusun berdasar nilai konsumsi bahan bakar rata-rata terendah dan emisi rata-rata terendah yaitu pada kecepatan 60 – 80 km/jam. Pada kecepatan ini faktor koreksi ditetapkan 1, sedangkan pada kecepatan yang lain dihitung berdasarkan emisi atau konsumsi bahan bakar.

$$Fk = \frac{Emisi_v}{Emisi_{60-80}} \times 1 \approx \frac{Fuel_v}{Fuel_{60-80}} \times 1$$

Hasil pendekatan faktor koreksi dengan pendekatan tersebut dapat dilihat pada Tabel L2.7. Nilai nilai pada tabel tersebut kemudian digunakan untuk memberikan koreksi beban emisi total yang dihitung pada sub bab L2.3

Tabel L2.7 Nilai faktor koreksi emisi berdasarkan kecepatan-rata-rata kendaraan

kecepatan rata-rata (km/jam)	faktor koreksi emisi
110	1.5
100	1.4
90	1.25
80	1
70	1
60	1
50	1.1
40	1.25
30	1.4
20	1.75
10	2.5
5	3.6

Koreksi kecepatan rata-rata terhadap hasil estimasi beban emisi (sub bab L2.3) dapat dilihat pada perhitungan di bawah ini. Jika diasumsikan kecepatan rata-rata (v) kendaraan sekitar 40 km/jam maka faktor koreksi (Fk) diperoleh sebesar 1.25. Dengan demikian beban emisi yang dihitung sebelumnya dikoreksi menjadi:

$$Q = Q_r \times Fk_v$$

$$Q = 11.05 \frac{g NOx}{s} \times 1.25 = 13.82 \frac{g NOx}{s}$$

Tahap terakhir adalah menguji nilai beban emisi ini diterapkan ke dalam model terbangun dan hasilnya dikorelasikan dengan data monitoring lapangan. Menguji beberapa nilai terhadap beban emisi inputan model dari sumber transportasi pada

penelitian ini diperoleh nilai 6. Dengan demikian nilai Q pada waktu tertentu dengan faktor kalibrasi adalah:

$$Q_t = Q \times 6 = 13.82 \frac{g \text{ NO}_x}{s} \times 6 = 82.89 \frac{g \text{ NO}_x}{s}$$

Hasil perhitungan pada ruas jalan yang lain dapat dilihat pada Tabel L2.2.

Rata-rata beban emisi pada sepanjang ruas jalan dengan asumsi distribusi kendaraan seragam adalah 82.89 g NO_x / s. Nilai ini dijadikan dasar perhitungan selanjutnya untuk mengestimasi beban emisi dengan perubahan waktu. Pada waktu yang berbeda beban emisi akhir (Q_F) dihitung menggunakan formula.

$$Q_F = Q_t \times F_T$$

Untuk kasus beban di atas, beban emisi pada pukul 08.30 (F_T = 1.88964) menjadi inputan dalam model dispersi dari *line sources*.

Lampiran 3 Form inputan, dan hasil model dalam program excel

Untuk memudahkan pengoperasian model terbangun, maka input dan output model diakses dengan program office excel. Sedangkan proses eksekusi model menggunakan program MATLAB. Form input dan output excel yang dihubungkan dengan program dispersi ini disusun dalam 6 sheet, yaitu:

L3.1 Form Phys_Data

Form ini berisi inputan data fisika atmosfer, pengaturan model, penentuan grid, penentuan area yang dimodelkan, arah dan kecepatan angin, GRAD, faktor yang dihasilkan dari Lampiran 2, dan faktor kinetika. Form-form tersebut adalah:

Input the physical data of Atmosphere

No	Paramater	Symbols	Value	Unit
1	Dispersion Coeffisien in horizontal direction	Dy	1.75	Torr.cm ² /s
2	Dispersion Coeffisien in vertical (z) direction	Dz	1.75	Torr.cm ² /s
3	Ambient Temperature	T ₀	30	C
4	Wind speed (average, dominant)	s		m/s
5	Wind direction (average, dominant)	a	60	⁰ (N)
6	Parameter Analysis	NO2	Oxides Nitrogen	
7	Kinetic Constant	λ		

Model Setting				
1	Starting Date, time	01/01/2010 00:30		
2	Interval of Analysis	0.5		hour
3	Grid Number	300		n x n
4	Average length per grid (l, w), modelled	93.333	60	m

Determine the Grid Number				
1	Area length (rectangular assumption)	28.00		km
2	Area width (rectangular assumption)	18.00		km
3	Area modelled per grid (rectangular assumption)	5600.00		m ²
4	Grid Number Aproximation	300.00		n x n
5	Average length per grid (l, w), approx	93.333	60	m

Determine of Modelling Area				
1	Lowest Lattitude; min_x	112.580		⁰ (E)
2	Highest Lattitude; max_x	112.859		⁰ (E)
3	Lowest Longitude; min_y	-7.365		⁰ (S)
4	Highest Longitude; max_y	-7.180		⁰ (S)

5	Citie's Identity	Surabaya
6	Insert Administrative Map	

Date, time	Speed (m/s)						
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF3-B	SUF4	SUF5	SUF6
01/01/2010 00:30	0.66				1.20	1.10	
01/01/2010 01:00	0.48				0.90	1.07	
01/01/2010 01:30	0.88				0.90	0.88	

Date, time	Direction (°, N)						
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF3-B	SUF4	SUF5	SUF6
01/01/2010 00:30	347.20				88.17	124.20	
01/01/2010 01:00	91.60				90.61	170.04	
01/01/2010 01:30	142.05				349.86	72.05	
01/01/2010 02:00	130.48				312.04	40.89	
01/01/2010 02:30	96.49				343.95	77.18	
01/01/2010 03:00	83.58				296.60	45.74	
01/01/2010 03:30	81.61				281.86	31.71	
01/01/2010 04:00	4.54				209.62	271.97	
01/01/2010 04:30	308.81				242.28	254.40	

Date, time	GRAD (watt/m2)						
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF3-B	SUF4	SUF5	SUF6
01/01/2010 07:00	58.37				17.33		
01/01/2010 07:30	75.31				21.25		
01/01/2010 08:00	104.47				43.92		
01/01/2010 08:30	186.13				55.77		
01/01/2010 09:00	251.16				94.15		
01/01/2010 09:30	201.19				99.28		
01/01/2010 10:00	215.32				96.80		

Date, time	Daily Factor	Weekly Factor	Totaly Factor	Kinetic Factor
	Transportation			

01/01/2010 01:00	0.004	1	0.004	0
01/01/2010 01:30	0.003	1	0.003	0
01/01/2010 02:00	0.007	1	0.007	0
01/01/2010 02:30	0.016	1	0.016	0
01/01/2010 03:00	0.025	1	0.025	0
01/01/2010 03:30	0.036	1	0.036	0
01/01/2010 04:00	0.058	1	0.058	0
01/01/2010 04:30	0.069	1	0.069	0

L3.2 Form PointS

Form ini berisi inputan data teknis inputan untuk sumber titik (point source). Hal-hal penting yang harus dimasukkan dalam form ini adalah lokasi titik (koordinat x dan y), tinggi sumber (stak), diameter, kecepatan alir, dan konsentrasi emisi. Form-form tersebut adalah:

Input the Point Sources technical data

No.	Stack's identity	y - coordinate	x -coordinate	technical height (m)	inner diameter average (m)	flow velocity (m/s)	Emis sion (g/m ³)	load (g/s)
1		-7.33579	112.71263	60	1.5	4	1.5	22
2		-7.35532	112.70770	60	2	4	1	26
3				1	1	1	0	0
4				1	1	1	0	0
5				1	1	1	0	0
6				1	1	1	0	0
7				1	1	1	0	0
8				1	1	1	0	0

L3.3 Form LineS

Form ini berisi inputan data teknis inputan untuk sumber garis (*lines source*). Hal-hal penting yang harus dimasukkan dalam form ini adalah lokasi jalan (koordinat x dan y), kelas jalan, rata-rata volume trafik dan kecepatan. Form-form tersebut adalah:

Input the Line Sources technical data

No.	Street Identity	Street Coordinate of Straight Segment (min_x, min_y, max_x, max_y) E, S				technical wide (m)	category (street class)	Average Traffic Volume (pvv/hours)	speed average (km/h)	normalized average load (g/s)
		y-in	y-fin	x-in	x-fin					
1	Jl. A Yani	-7.35775	-7.31664	112.729	112.734	30	Primary Artery	14533	40	82.89
2	Jl. Wonokromo	-7.31664	-7.29588	112.734	112.739	30	Primary Artery	22657	30	144.74
3	Jl. Raya Darmo	-7.29588	-7.27325	112.739	112.742		Primary Artery	15000	40	85.56
4	Jl. Basuki Rahmat - Tunjungan	-7.27325	-7.25578	112.742	112.737		Secondary Artery	8668	40	49.44
5	Jl. Jend Sudirman - Urip Sumoharjo	-7.27325	-7.26143	112.742	112.746	15	Secondary Artery	10331	50	51.86
6	Jl. Diponegoro	-7.29588	-7.27498	112.739	112.727		Primary Artery	8159	50	40.95
7	Jl. Kedungdoro - Blauran - Bubutan	-7.27498	-7.24366	112.727	112.737	10.5	Secondary Artery	5826	30	37.22
8	Jl. Gembongan - Veteran	-7.25578	-7.23662	112.737	112.738		Secondary Artery	5119	30	32.70
9	Jl. Indrapura	-7.24366	-7.234	112.737	112.731		Secondary Artery	3492	60	15.93
10	Jl. Rajawali - Kenjeran	-7.23347	-7.25688	112.728	112.805		Primary Artery	2300	50	11.54
11	Jl. Gresik	-7.23347	-7.22958	112.728	112.672		Primary Artery	6362	60	29.03
12	Jl. TO Wilangan	-7.22958	-7.22011	112.672	112.656		Primary Artery	2598	40	14.82
13		-7.22011	-7.19415	112.656	112.645		Primary Artery	2598	40	14.82
14	Jl. Margomulyo	-7.25695	-7.2303	112.68	112.683		Secondary Artery	4197	60	19.15
15	Jl. Arjuno	-7.26846	-7.26393	112.729	112.727		Primary Artery	4756	40	27.13
16		-7.26393	-7.2552	112.727	112.728		Primary Artery	4756	40	27.13
17	Jl. Kalibutih-Kranggan-Gentengkali	-7.25447	-7.25623	112.717	112.743		Primary Artery	4578	50	22.98
18	Jl. Tidar - Embong Malang	-7.25715	-7.2614	112.728	112.74		Primary Collector	6529	50	32.77
19	Jl. Demak	-7.25472	-7.23296	112.72	112.721		Primary Artery	4337	50	21.77
20	Jl. Dupak	-7.2446	-7.2469	112.711	112.737	25	Secondary Artery	6306	30	40.28
21	Jl. Gub Suryo - Pemuda	-7.2614	-7.26646	112.74	112.751		Secondary Artery	6380	60	29.11
22	Jl. Kedung cowek - Suramadu	-7.24542	-7.18698	112.769	112.78		High Way (Toll)	3003	70	13.70
23	Jl. Tanjung Perak	-7.23347	-7.19658	112.728	112.734		Primary Artery	4942	30	31.57
24	Jl. Muljorejo	-7.25288	-7.27455	112.795	112.798		Primary Collector	4074	50	20.45
25	Raya ITS	-7.27455	-7.27917	112.798	112.79		Primary Collector	4074	40	23.24
26	Jl. Kertajaya	-7.27917	-7.27709	112.79	112.745	20	Secondary Artery	4288	50	21.52

L3.4 Form AreaS

Form ini berisi inputan data teknis inputan untuk sumber area (*areas source*). Hal-hal penting yang harus dimasukkan dalam form ini adalah lokasi area (koordinat x dan y), densitas tiap grid, kategori area. Form-form tersebut adalah:

Input the Line Sources technical data										
No.	Area (residence) Identity	Diagonal Segment of Area				GRID		grid density (number of area source/grid)	category (residence class)	average load (g/s.grid)
		y-in	y-fin	x-in	x-fin					
1		-7.35	-7.341	112.66	112.669		41	Middle Class Residence	0.12359003	
2		-7.35	-7.341	112.67	112.679		41	Middle Class Residence	0.12359003	
3		-7.35	-7.341	112.68	112.689		41	Middle Class Residence	0.12359003	
4		-7.35	-7.341	112.72	112.729		15	High Class Residence	0.05876760	
5		-7.35	-7.341	112.73	112.739		15	High Class Residence	0.05876760	
6		-7.35	-7.341	112.74	112.749		169	Low Class Residence	0.37657266	
7		-7.34	-7.331	112.67	112.679		169	Low Class Residence	0.37657266	
8		-7.34	-7.331	112.68	112.689		12	Office Area	0.74154020	
9		-7.34	-7.331	112.69	112.699		4	Industrial Area	0.78356793	
10		-7.34	-7.331	112.7	112.709		41	Bussiness Area	0.37077010	
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										

L3.5 Data monitoring kualitas udara (AQ_Data)

Form ini berisi inputan data hasil monitoring pada titik-titik referensi (SUF).

Form-form tersebut adalah:

NO2	Air Quality Data						
Date, time	Ambient Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF3-B	SUF4	SUF5	SUF6
01/01/2010 00:30	0.0	0.0	0.0	0.0	33.4	0.0	0.0
01/01/2010 01:00	0.0	0.0	0.0	0.0	44.0	0.0	0.0
01/01/2010 01:30	0.0	0.0	0.0	0.0	38.1	0.0	0.0
01/01/2010 02:00	0.0	0.0	0.0	0.0	54.1	0.0	0.0
01/01/2010 02:30	0.0	0.0	0.0	0.0	37.6	0.0	0.0
01/01/2010 03:00	0.0	0.0	0.0	0.0	47.5	0.0	0.0
01/01/2010 03:30	0.0	0.0	0.0	0.0	39.7	0.0	0.0
01/01/2010 04:00	0.0	0.0	0.0	0.0	33.7	0.0	0.0
01/01/2010 04:30	0.0	0.0	0.0	0.0	26.4	0.0	0.0
01/01/2010 05:00	0.0	0.0	0.0	0.0	22.1	0.0	0.0
01/01/2010 05:30	0.0	0.0	0.0	0.0	23.9	0.0	0.0
01/01/2010 06:00	0.0	0.0	0.0	0.0	31.6	0.0	0.0
01/01/2010 06:30	0.0	0.0	0.0	0.0	28.8	0.0	0.0
01/01/2010 07:00	0.0	0.0	0.0	0.0	36.3	0.0	0.0
01/01/2010 07:30	0.0	0.0	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0
01/01/2010 08:00	0.0	0.0	0.0	0.0	28.5	0.0	0.0
01/01/2010 08:30	0.0	0.0	0.0	0.0	40.6	0.0	0.0
01/01/2010 09:00	0.0	0.0	0.0	0.0	31.8	0.0	0.0
01/01/2010 09:30	0.0	0.0	0.0	0.0	27.1	0.0	0.0
01/01/2010 10:00	0.0	0.0	0.0	0.0	27.9	0.0	0.0
01/01/2010 10:30	0.0	0.0	0.0	0.0	25.6	0.0	0.0
01/01/2010 11:00	0.0	0.0	0.0	0.0	33.9	0.0	0.0
01/01/2010 11:30	0.0	0.0	0.0	0.0	24.7	0.0	0.0
01/01/2010 12:00	0.0	0.0	0.0	0.0	19.6	0.0	0.0
01/01/2010 12:30	0.0	0.0	0.0	0.0	11.8	0.0	0.0
01/01/2010 13:00	0.0	0.0	0.0	0.0	21.9	0.0	0.0
01/01/2010 13:30	0.0	0.0	0.0	0.0	14.6	0.0	0.0
01/01/2010 14:00	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	0.0
01/01/2010 14:30	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	0.0	0.0
01/01/2010 15:00	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	0.0	0.0
01/01/2010 15:30	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	0.0	0.0
01/01/2010 16:00	0.0	0.0	0.0	0.0	22.1	0.0	0.0
01/01/2010 16:30	0.0	0.0	0.0	0.0	49.7	0.0	0.0
01/01/2010 17:00	0.0	0.0	0.0	0.0	49.0	0.0	0.0
01/01/2010 17:30	0.0	0.0	0.0	0.0	45.5	0.0	0.0
01/01/2010 18:00	0.0	0.0	0.0	0.0	19.2	0.0	0.0

L3.6 Hasil menjalankan model (Result_Model)

Form ini berisi data hasil estimasi model pada titik-titik referensi (SUF).

Form-form tersebut adalah:

NO2	Air Quality Model Result						
	Estimation of Concentration in						
	SUF-1	SUF-2	SUF-3	SUF-4	SUF-5	SUF-3B	SUF-6
01/01/2010 00:30	14.4	10.8	12.5	75.4	7.6		
01/01/2010 01:00	10.3	7.7	13.8	57.8	5.7		
01/01/2010 01:30	21.5	29.4	11.3	17.3	1.8		
01/01/2010 02:00	4.4	24.5	10.8	14.9	0.0		
01/01/2010 02:30	1.8	4.7	2.4	2.9	0.2		
01/01/2010 03:00	1.1	2.6	2.1	4.5	0.0		
01/01/2010 03:30	1.2	2.3	2.1	9.3	0.0		
01/01/2010 04:00	1.3	5.9	2.6	3.8	0.1		
01/01/2010 04:30	1.9	2.7	6.6	2.5	0.0		
01/01/2010 05:00	1.3	2.3	7.2	4.5	0.0		
01/01/2010 05:30	1.5	4.0	2.8	2.6	0.0		
01/01/2010 06:00	31.5	17.1	33.4	38.5	2.7		
01/01/2010 06:30	30.8	15.3	30.1	32.6	2.4		
01/01/2010 07:00	30.2	13.6	28.5	27.5	0.9		
01/01/2010 07:30	27.8	17.2	14.3	37.2	52.7		
01/01/2010 08:00	62.6	29.8	19.5	21.6	46.9		
01/01/2010 08:30	34.5	16.0	27.0	22.9	6.1		
01/01/2010 09:00	26.2	14.8	24.3	19.3	0.2		
01/01/2010 09:30	51.4	18.7	23.4	24.1	40.4		
01/01/2010 10:00	54.4	19.1	19.0	21.7	41.5		
01/01/2010 10:30	53.4	21.7	18.6	19.4	41.5		
01/01/2010 11:00	47.6	15.6	17.3	17.1	35.6		
01/01/2010 11:30	46.3	13.8	10.1	16.5	40.1		
01/01/2010 12:00	40.7	9.9	12.8	13.4	32.5		
01/01/2010 12:30	48.2	15.4	10.8	16.7	41.2		
01/01/2010 13:00	26.3	9.2	13.1	13.1	20.3		
01/01/2010 13:30	26.0	9.5	16.3	12.7	1.0		
01/01/2010 14:00	37.2	11.7	21.5	15.3	25.3		
01/01/2010 14:30	58.5	25.7	10.6	30.5	72.1		
01/01/2010 15:00	55.3	24.1	9.0	39.1	69.7		
01/01/2010 15:30	29.8	10.5	25.5	20.0	0.3		
01/01/2010 16:00	30.0	17.4	29.1	25.5	11.1		
01/01/2010 16:30	62.4	28.2	17.0	52.8	77.6		
01/01/2010 17:00	41.4	23.1	17.4	47.9	73.9		
01/01/2010 17:30	39.1	18.7	33.0	41.6	10.1		
01/01/2010 18:00	38.1	13.1	30.9	30.8	3.2		

Lampiran 4 Contoh lembar data monitoring kualitas udara ambient, angin dan GRAD Kota Surabaya (tanggal 1 Januari dan 7 Januari 2010)

L4.1 lembar data monitoring kualitas udara ambient



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter
Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date: 01.01.2010

Parameter / Parameter: NO2 (Nitrogen dioxide / Nitrogen dioksida) [ug/m3]

Satuan / Unit: ug/m3

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya		Surabaya		Surabaya		Surabaya	
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF4	SUF5			
	Taman Prestasi	Perak Timur	Sukomanunggal	Gayungan	Gebang Putih			
00:30	0.00	---	---	33.35	1.88			
01:00	0.00	---	---	44.04	1.88			
01:30	0.00	---	---	38.12	1.88			
02:00	0.00	---	---	54.10	1.88			
02:30	0.00	---	---	37.57	1.88			
03:00	0.00	---	---	47.55	1.88			
03:30	0.00	---	---	39.65	1.88			
04:00	0.00	---	---	33.65	1.88			
04:30	0.00	---	---	26.35	1.88			
05:00	0.00	---	---	22.12	1.88			
05:30	0.00	---	---	23.85	1.88			
06:00	---	□	---	---	□			
06:30	---	□	---	28.80	1.88			
07:00	0.00	□	---	36.25	1.88			
07:30	0.00	---	---	33.26	1.88			
08:00	0.00	---	---	28.53	1.88			
08:30	0.00	---	---	40.62	1.88			
09:00	0.00	---	---	31.80	1.88			
09:30	0.00	---	---	27.06	1.77			
10:00	0.00	---	---	27.92	1.88			
10:30	0.00	---	---	25.65	---	□		
11:00	0.00	---	---	33.89	1.88			
11:30	0.00	---	---	24.69	1.88			
12:00	0.00	---	---	19.57	1.88			
12:30	0.00	---	---	11.77	1.88			
13:00	0.00	---	---	21.85	1.88			
13:30	0.00	---	---	14.65	1.88			
14:00	0.00	---	---	12.99	1.88			
14:30	0.00	---	---	7.80	1.88			
15:00	0.00	---	---	9.59	1.88			
15:30	0.00	---	---	25.93	1.88			
16:00	0.00	---	---	22.13	1.88			
16:30	0.00	---	---	49.71	1.88			
17:00	0.00	---	---	49.04	1.88			
17:30	0.00	---	---	45.50	1.88			
18:00	0.00	---	---	19.16	1.88			
18:30	0.00	---	---	16.70	1.88			
19:00	0.00	---	---	21.98	1.88			
19:30	0.00	---	---	35.88	1.88			
20:00	0.00	---	---	27.35	1.88			
20:30	0.00	---	---	29.17	1.88			
21:00	0.00	---	---	47.44	1.88			
21:30	0.00	---	---	58.97	1.88			
22:00	0.00	---	---	40.51	1.88			
22:30	0.00	---	---	45.61	1.88			
23:00	0.00	---	---	46.97	1.88			
23:30	0.00	---	---	37.05	1.88			
24:00:00	0.00	---	---	30.99	1.88			
Minimum / Minimum	0.00	---	---	7.80	1.77			
Nilai Rata-rata / Mean	0.00	---	---	31.64	1.88			
Maksimum / Maximum	0.00	---	---	58.97	1.88			

Singkatan / Legend:
 □ values unseen / nilai tidak terlihat
 A) no values received / nilai tidak terdefinisi
 C) values invalid / nilai tidak valid

Disiapkan oleh / Prepared by

Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature

Diperiksa oleh / Checked by

Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter
Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date:
Parameter / Parameter:
Satuan / Unit:

07.01.2010
NO2 (Nitrogen dioxide / Nitrogen dioksida) [ug/m3]
ug/m3

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya		Surabaya		Surabaya	
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF4	SUF5	
	Taman Prestasi	Perak Timur	Sukomanunggal	Gayungan	Gebang Putih	
00:30	0.00	---	---	14.74	1.88	
01:00	0.00	---	---	19.90	1.88	
01:30	0.00	---	---	20.21	1.88	
02:00	0.00	---	---	17.84	1.88	
02:30	---	---	---	23.23	1.88	
03:00	0.00	---	---	21.76	1.88	
03:30	0.00	---	---	16.95	1.88	
04:00	0.00	---	---	---	1.88	
04:30	0.00	---	---	---	1.88	
05:00	0.00	---	---	28.04	1.88	
05:30	0.00	---	---	31.58	1.88	
06:00	0.00	---	---	---	1.79	
06:30	0.00	---	---	---	1.88	
07:00	0.00	---	---	---	---	
07:30	0.00	---	---	---	1.88	
08:00	0.00	---	---	---	1.88	
08:30	0.00	---	---	---	1.88	
09:00	0.00	---	---	55.41	1.88	
09:30	0.00	---	---	29.03	1.88	
10:00	0.00	---	---	15.79	1.88	
10:30	0.00	---	---	14.73	1.88	
11:00	0.00	---	---	13.19	1.88	
11:30	0.00	---	---	11.75	1.88	
12:00	0.00	---	---	10.01	1.88	
12:30	0.00	---	---	9.92	1.88	
13:00	0.00	---	---	7.77	1.88	
13:30	0.00	---	---	11.14	1.88	
14:00	0.00	---	---	12.35	1.88	
14:30	0.00	---	---	18.63	1.88	
15:00	0.00	---	---	23.42	1.88	
15:30	0.00	---	---	27.84	1.88	
16:00	0.00	---	---	34.14	1.88	
16:30	0.00	---	---	46.67	1.88	
17:00	0.00	---	---	38.02	1.88	
17:30	0.00	---	---	34.90	1.88	
18:00	0.00	---	---	54.93	1.88	
18:30	0.00	---	---	57.73	1.88	
19:00	0.00	---	---	57.70	1.88	
19:30	0.00	---	---	66.79	1.88	
20:00	0.00	---	---	55.68	1.88	
20:30	0.00	---	---	50.53	1.88	
21:00	0.00	---	---	37.76	1.88	
21:30	0.00	---	---	27.48	1.88	
22:00	0.00	---	---	19.76	1.88	
22:30	0.00	---	---	10.51	1.88	
23:00	0.00	---	---	13.05	1.88	
23:30	0.00	---	---	10.65	1.88	
24:00:00	0.00	---	---	7.52	1.88	
Minimum / Minimum	0.00	---	---	7.52	1.79	
Nilai Rata-rata / Mean	0.00	---	---	26.98	1.88	
Maksimum / Maximum	0.00	---	---	66.79	1.88	

Singkatan / Legend:

1) values unseen / nilai tidak terlihat

A) no values received / nilai tidak terdefinisi

C) values invalid / nilai tidak valid

Disiapkan oleh / Prepared by	Diperiksa oleh / Checked by
Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature	Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature

L4.2 lembar data monitoring radiasi permukaan (GRAD)



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter
Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date:
Parameter / Parameter:
Satuan / Unit:

01.01.2010
GRAD (Global radiation / Radiasi global) [W/m2]
W/m2

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya	Surabaya	Surabaya	Surabaya	Surabaya
	SUF1 Taman Prestasi	SUF2 Perak Timur	SUF3 Sukomanunggal	SUF4 Gayungan	SUF5 Gebang Putih
00:30	0.04	---	---	0.00	0.00
01:00	0.00	---	---	0.00	0.00
01:30	0.00	---	---	0.00	0.00
02:00	0.00	---	---	0.00	0.00
02:30	0.00	---	---	0.00	0.00
03:00	0.00	---	---	0.00	0.00
03:30	0.00	---	---	0.00	0.00
04:00	0.00	---	---	0.00	0.00
04:30	0.00	---	---	0.00	0.00
05:00	0.00	---	---	0.00	0.00
05:30	1.12	---	---	0.19	0.00
06:00	15.51	---	---	5.38	0.00
06:30	34.92	---	---	10.59	0.00
07:00	58.37	---	---	17.33	0.00
07:30	75.31	---	---	21.25	0.00
08:00	104.47	---	---	43.92	0.00
08:30	186.13	---	---	55.77	0.00
09:00	251.16	---	---	94.15	0.00
09:30	201.19	---	---	99.28	0.00
10:00	215.32	---	---	96.80	0.00
10:30	253.56	---	---	90.55	0.00
11:00	395.87	---	---	115.42	0.00
11:30	580.79	---	---	122.05	0.00
12:00	849.05	---	---	131.65	0.00
12:30	419.07	---	---	209.52	0.00
13:00	787.90	---	---	374.94	0.00
13:30	642.79	---	---	372.06	0.00
14:00	185.14	---	---	221.29	0.00
14:30	84.00	---	---	20.74	0.00
15:00	64.77	---	---	18.99	0.00
15:30	78.37	---	---	27.18	0.00
16:00	96.60	---	---	34.61	0.00
16:30	71.51	---	---	17.58	0.00
17:00	44.50	---	---	7.53	0.00
17:30	23.91	---	---	1.13	0.00
18:00	11.18	---	---	0.00	0.00
18:30	2.04	---	---	0.00	0.00
19:00	0.55	---	---	0.00	0.00
19:30	1.06	---	---	0.00	0.00
20:00	0.98	---	---	0.00	0.00
20:30	0.88	---	---	0.00	0.00
21:00	0.88	---	---	0.00	0.00
21:30	1.34	---	---	0.00	0.00
22:00	1.89	---	---	0.00	0.00
22:30	2.54	---	---	0.00	0.00
23:00	2.65	---	---	0.00	0.00
23:30	2.50	---	---	0.00	0.00
24:00:00	2.41	---	---	0.00	0.00
Minimum / Minimum	0.00	---	---	0.00	0.00
Nilai Rata-rata / Mean	119.84	---	---	46.04	0.00
Maksimum / Maximum	849.05	---	---	374.94	0.00

Singkatan / Legend:

1) values unseen / nilai tidak terlihat

A) no values received / nilai tidak terdefinisi

Disiapkan oleh / Prepared by	Diperiksa oleh / Checked by
Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature	Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter
Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date:
Parameter / Parameter:
Satuan / Unit:

07.01.2010
GRAD (Global radiation / Radiasi global) [W/m ²]
W/m ²

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya		Surabaya		Surabaya		Surabaya	
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF4	SUF5			
	Taman Prestasi	Perak Timur	Sukomanunggal	Gayungan	Gebang Putih			
00:30	0.00	---	---	0.00	0.00			
01:00	0.00	---	---	0.00	0.00			
01:30	0.00	---	---	0.00	0.00			
02:00	0.00	---	---	0.00	0.00			
02:30	0.00	---	---	0.00	0.00			
03:00	0.00	---	---	0.00	0.00			
03:30	0.00	---	---	0.00	0.00			
04:00	0.00	---	---	---	0.00			
04:30	0.00	---	---	---	0.00			
05:00	0.00	---	---	0.00	0.00			
05:30	0.77	---	---	0.00	0.00			
06:00	20.00	---	---	---	0.00			
06:30	47.07	---	---	---	0.00			
07:00	106.36	---	---	---	0.00			
07:30	238.16	---	---	---	0.00			
08:00	276.16	---	---	---	0.00			
08:30	303.64	---	---	---	0.00			
09:00	321.83	---	---	95.32	0.00			
09:30	264.74	---	---	100.31	0.00			
10:00	209.35	---	---	84.49	0.00			
10:30	226.51	---	---	85.37	0.00			
11:00	242.84	---	---	94.69	0.00			
11:30	228.29	---	---	64.68	0.00			
12:00	212.06	---	---	82.73	0.00			
12:30	183.34	---	---	93.70	0.00			
13:00	204.94	---	---	67.11	0.00			
13:30	210.58	---	---	86.36	0.00			
14:00	218.94	---	---	83.49	0.00			
14:30	167.24	---	---	41.55	0.00			
15:00	155.87	---	---	46.95	0.00			
15:30	154.63	---	---	61.89	0.00			
16:00	183.70	---	---	67.15	0.00			
16:30	133.63	---	---	52.41	0.00			
17:00	76.32	---	---	27.10	0.00			
17:30	40.24	---	---	11.85	0.00			
18:00	18.16	---	---	1.03	0.00			
18:30	14.54	---	---	0.00	0.00			
19:00	14.10	---	---	0.00	0.00			
19:30	13.40	---	---	0.00	0.00			
20:00	14.08	---	---	0.00	0.00			
20:30	14.10	---	---	0.00	0.00			
21:00	13.96	---	---	0.00	0.00			
21:30	14.12	---	---	0.00	0.00			
22:00	14.28	---	---	0.00	0.00			
22:30	13.96	---	---	0.00	0.00			
23:00	13.69	---	---	0.00	0.00			
23:30	13.92	---	---	0.00	0.00			
24:00:00	13.78	---	---	0.00	0.00			
Minimum / Minimum	0.00	---	---	0.00	0.00			
Nilai Rata-rata / Mean	96.09	---	---	31.20	0.00			
Maksimum / Maximum	321.83	---	---	100.31	0.00			

Singkatan / Legend:

1) values unseen / nilai tidak terlihat

A) no values received / nilai tidak terdefinisi

C) values invalid / nilai tidak valid

Disiapkan oleh / Prepared by	Diperiksa oleh / Checked by
Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature	Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature

L4.3 lembar data monitoring kecepatan angin



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date:
Parameter / Parameter:
Satuan / Unit:

01.01.2010
FF (Wind speed / Kecepatan angin) [m/s]
m/s

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya	Surabaya	Surabaya	Surabaya	Surabaya
	SUF1 Taman Prestasi	SUF2 Perak Timur	SUF3 Sukomanunggal	SUF4 Gayungan	SUF5 Gebang Putih
00:30	0.66	---	---	0.28	1.10
01:00	0.48	---	---	0.11	1.07
01:30	0.88	---	---	0.03	0.88
02:00	0.26	---	---	0.20	0.53
02:30	0.33	---	---	0.14	1.78
03:00	0.42	---	---	0.08	1.21
03:30	0.23	---	---	0.61	1.38
04:00	0.42	---	---	0.46	1.61
04:30	1.97	---	---	0.57	1.26
05:00	0.95	---	---	0.11	2.97
05:30	1.10	---	---	0.01	1.65
06:00	0.82	---	---	0.03	1.78
06:30	0.48	---	---	0.02	1.57
07:00	1.02	---	---	0.07	2.37
07:30	1.35	---	---	0.13	1.00
08:00	1.10	---	---	0.03	2.79
08:30	0.50	---	---	0.29	3.62
09:00	0.73	---	---	0.18	2.35
09:30	0.69	---	---	0.39	0.49
10:00	0.44	---	---	1.01	1.97
10:30	0.64	---	---	1.00	4.03
11:00	0.97	---	---	0.91	2.65
11:30	0.77	---	---	1.31	3.58
12:00	0.64	---	---	0.47	3.06
12:30	0.73	---	---	0.49	5.05
13:00	3.88	---	---	0.64	5.25
13:30	3.59	---	---	1.52	7.82
14:00	4.70	---	---	1.45	11.41
14:30	5.17	---	---	3.20	7.82
15:00	5.30	---	---	0.87	8.28
15:30	4.39	---	---	1.09	7.46
16:00	0.90	---	---	0.04	3.93
16:30	0.78	---	---	0.18	2.10
17:00	2.59	---	---	0.14	3.71
17:30	0.97	---	---	0.50	1.88
18:00	2.21	---	---	0.88	6.46
18:30	3.85	---	---	0.40	6.29
19:00	1.88	---	---	0.09	3.46
19:30	1.09	---	---	0.00	1.62
20:00	0.72	---	---	0.08	0.45
20:30	0.44	---	---	0.23	0.27
21:00	0.11	---	---	0.75	1.20
21:30	0.31	---	---	0.24	0.34
22:00	0.59	---	---	0.17	0.33
22:30	0.46	---	---	0.01	0.09
23:00	0.17	---	---	0.15	0.96
23:30	0.39	---	---	0.03	0.25
24:00:00	0.19	---	---	0.07	0.55
Minimum / Minimum	0.11	---	---	0.00	0.09
Nilai Rata-rata / Mean	1.32	---	---	0.45	2.79
Maksimum / Maximum	5.30	---	---	3.20	11.41

Singkatan / Legend:

1) values unseen / nilai tidak terlihat

A) no values received / nilai tidak terdefinisi

Disiapkan oleh / Prepared by	Diperiksa oleh / Checked by
Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature	Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter
Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date:
Parameter / Parameter:
Satuan / Unit:

01.01.2010
FF (Wind speed / Kecepatan angin) [m/s]
m/s

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya		Surabaya		Surabaya	
	SUF1	SUF2	SUF3	SUF4	SUF5	
	Taman Prestasi	Perak Timur	Sukomanunggal	Gayungan	Gebang Putih	
00:30	0.66	---	ATI	0.28	1.10	
01:00	0.48	---	ATI	0.11	1.07	
01:30	0.88	---	ATI	0.03	0.88	
02:00	0.26	---	ATI	0.20	0.53	
02:30	0.33	---	ATI	0.14	1.78	
03:00	0.42	---	ATI	0.08	1.21	
03:30	0.23	---	ATI	0.61	1.38	
04:00	0.42	---	ATI	0.46	1.61	
04:30	1.97	---	ATI	0.57	1.26	
05:00	0.95	---	ATI	0.11	2.97	
05:30	1.10	---	ATI	0.01	1.65	
06:00	0.82	---	ATI	0.03	1.78	
06:30	0.48	---	ATI	0.02	1.57	
07:00	1.02	---	ATI	0.07	2.37	
07:30	1.35	---	ATI	0.13	1.00	
08:00	1.10	---	ATI	0.03	2.79	
08:30	0.50	---	ATI	0.29	3.62	
09:00	0.73	---	ATI	0.18	2.35	
09:30	0.69	---	ATI	0.39	0.49	
10:00	0.44	---	ATI	1.01	1.97	
10:30	0.64	---	ATI	1.00	4.03	
11:00	0.97	---	ATI	0.91	2.65	
11:30	0.77	---	ATI	1.31	3.58	
12:00	0.64	---	ATI	0.47	3.06	
12:30	0.73	---	ATI	0.49	5.05	
13:00	3.88	---	ATI	0.64	5.25	
13:30	3.59	---	ATI	1.52	7.82	
14:00	4.70	---	ATI	1.45	11.41	
14:30	5.17	---	ATI	3.20	7.82	
15:00	5.30	---	ATI	0.87	8.28	
15:30	4.39	---	ATI	1.09	7.46	
16:00	0.90	---	ATI	0.04	3.93	
16:30	0.78	---	ATI	0.18	2.10	
17:00	2.59	---	ATI	0.14	3.71	
17:30	0.97	---	ATI	0.50	1.88	
18:00	2.21	---	ATI	0.88	6.46	
18:30	3.85	---	ATI	0.40	6.29	
19:00	1.88	---	ATI	0.09	3.46	
19:30	1.09	---	ATI	0.00	1.62	
20:00	0.72	---	ATI	0.08	0.45	
20:30	0.44	---	ATI	0.23	0.27	
21:00	0.11	---	ATI	0.75	1.20	
21:30	0.31	---	ATI	0.24	0.34	
22:00	0.59	---	ATI	0.17	0.33	
22:30	0.46	---	ATI	0.01	0.09	
23:00	0.17	---	ATI	0.15	0.96	
23:30	0.39	---	ATI	0.03	0.25	
24:00:00	0.19	---	ATI	0.07	0.55	
Minimum / Minimum	0.11	---	---	0.00	0.09	
Nilai Rata-rata / Mean	1.32	---	---	0.45	2.79	
Maksimum / Maximum	5.30	---	---	3.20	11.41	

Singkatan / Legend:

1) values unseen / nilai tidak terihat

A) no values received / nilai tidak terdefinisi

Disiapkan oleh / Prepared by	Diperiksa oleh / Checked by
Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature	Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature

L4.4 lembar data monitoring arah angin



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter
Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date:
Parameter / Parameter:
Satuan / Unit:

01.01.2010
DD (Wind direction / Arah angin) [Degrees]
Degrees

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya	Surabaya	Surabaya	Surabaya	Surabaya
	SUF1 Taman Prestasi	SUF2 Perak Timur	SUF3 Sukomanunggal	SUF4 Gayungan	SUF5 Gebang Putih
00:30	347.20	---	---	88.17	124.20
01:00	91.60	---	---	90.61	170.04
01:30	142.05	---	---	349.86	72.05
02:00	130.48	---	---	312.04	40.89
02:30	96.49	---	---	343.95	77.18
03:00	83.58	---	---	296.60	45.74
03:30	81.61	---	---	281.86	31.71
04:00	4.54	---	---	209.62	271.97
04:30	308.81	---	---	242.28	254.40
05:00	195.24	---	---	257.81	236.07
05:30	174.46	---	---	221.23	215.41
06:00	201.47	---	---	221.22	211.45
06:30	220.35	---	---	221.26	217.48
07:00	218.71	---	---	228.11	171.79
07:30	151.52	---	---	121.57	107.21
08:00	95.63	---	---	355.51	44.01
08:30	8.28	---	---	281.86	14.82
09:00	333.89	---	---	259.20	12.44
09:30	14.95	---	---	341.93	108.41
10:00	24.63	---	---	347.18	12.34
10:30	327.99	---	---	351.40	29.92
11:00	81.96	---	---	337.85	10.56
11:30	71.25	---	---	357.32	29.97
12:00	82.69	---	---	331.07	63.53
12:30	13.15	---	---	357.88	87.47
13:00	300.79	---	---	306.89	85.35
13:30	338.57	---	---	276.26	66.38
14:00	352.37	---	---	316.54	23.04
14:30	316.32	---	---	48.29	282.83
15:00	299.11	---	---	70.06	266.80
15:30	292.74	---	---	231.48	273.90
16:00	246.80	---	---	289.68	266.64
16:30	214.74	---	---	81.97	219.38
17:00	300.78	---	---	262.21	277.48
17:30	197.19	---	---	190.06	207.44
18:00	181.39	---	---	174.07	200.94
18:30	183.23	---	---	161.00	193.58
19:00	204.64	---	---	131.96	212.07
19:30	155.76	---	---	123.92	237.04
20:00	133.12	---	---	66.94	168.57
20:30	31.65	---	---	14.24	55.49
21:00	35.46	---	---	322.69	284.42
21:30	50.17	---	---	311.60	244.84
22:00	138.22	---	---	27.49	169.89
22:30	146.69	---	---	68.68	130.37
23:00	122.72	---	---	167.73	138.83
23:30	175.41	---	---	176.07	227.87
24:00:00	177.78	---	---	176.08	218.98
Minimum / Minimum	4.54	---	---	14.24	10.56
Nilai Rata-rata / Mean	168.71	---	---	225.07	148.19
Maksimum / Maximum	352.37	---	---	357.88	284.42

Singkatan / Legend:

1) values unseen / nilai tidak terlihat

A) no values received / nilai tidak terdefinisi

Disiapkan oleh / Prepared by	Diperiksa oleh / Checked by
Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature	Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature



The Integrated Air Quality Management for Metropolitan Areas

Laporan harian kualitas udara untuk parameter
Daily Air Quality Report for Parameters



Tanggal / Date:
Parameter / Parameter:
Satuan / Unit:

07.01.2010
DD (Wind direction / Arah angin) [Degrees]
Degrees

Laporan disiapkan di / Report prepared at: Regional Center Surabaya
Laporan berdasarkan data setengah jam rata-rata / Report based on half hour mean values

Waktu / Time GMT+7 (WIB)	Surabaya		Surabaya		Surabaya	
	SUF1 Taman Prestasi	SUF2 Perak Timur	SUF3 Sukomanunggal	SUF4 Gayungan	SUF5 Gebang Putih	
00:30	285.64	---	---	244.29	264.86	
01:00	297.46	---	---	258.99	276.08	
01:30	288.58	---	---	234.11	245.34	
02:00	253.57	---	---	254.98	266.07	
02:30	252.01	---	---	287.25	272.08	
03:00	283.77	---	---	225.14	242.18	
03:30	222.98	---	---	250.23	240.52	
04:00	247.57	---	---	---	290.96	
04:30	259.26	---	---	---	178.65	
05:00	357.85	---	---	272.71	257.76	
05:30	325.26	---	---	357.72	314.84	
06:00	325.25	---	---	---	29.86	
06:30	315.64	---	---	---	313.40	
07:00	296.50	---	---	---	294.52	
07:30	338.24	---	---	---	284.58	
08:00	44.26	---	---	---	29.71	
08:30	63.39	---	---	---	41.28	
09:00	9.30	---	---	4.52	30.76	
09:30	53.49	---	---	29.15	37.58	
10:00	54.52	---	---	54.29	34.62	
10:30	44.27	---	---	60.23	43.83	
11:00	28.95	---	---	58.34	45.32	
11:30	26.76	---	---	42.75	46.57	
12:00	3.47	---	---	39.67	32.65	
12:30	34.51	---	---	36.84	38.91	
13:00	47.05	---	---	49.07	33.29	
13:30	32.24	---	---	56.18	38.49	
14:00	83.18	---	---	56.51	54.60	
14:30	95.42	---	---	109.34	69.40	
15:00	115.37	---	---	193.72	90.35	
15:30	215.86	---	---	199.20	136.17	
16:00	170.41	---	---	169.69	171.12	
16:30	133.69	---	---	172.02	174.51	
17:00	140.95	---	---	167.05	160.09	
17:30	169.98	---	---	194.87	192.44	
18:00	160.90	---	---	180.61	191.12	
18:30	166.11	---	---	214.32	164.31	
19:00	171.37	---	---	268.12	246.11	
19:30	244.16	---	---	274.01	261.88	
20:00	280.50	---	---	283.97	266.90	
20:30	302.50	---	---	249.21	264.39	
21:00	302.10	---	---	289.38	278.81	
21:30	300.16	---	---	283.97	273.40	
22:00	303.58	---	---	295.06	268.45	
22:30	304.54	---	---	297.02	287.55	
23:00	302.59	---	---	278.78	283.78	
23:30	296.98	---	---	286.05	288.84	
24:00:00	299.43	---	---	273.01	274.34	
Minimum / Minimum	3.47	---	---	4.52	29.71	
Nilai Rata-rata / Mean	194.82	---	---	188.81	179.65	
Maksimum / Maximum	357.85	---	---	357.72	314.84	

Singkatan / Legend:

1) values unseen / nilai tidak terlihat

A) no values received / nilai tidak terdefinisi

C) values invalid / nilai tidak valid

Disiapkan oleh / Prepared by	Diperiksa oleh / Checked by
Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature	Tanggal-Tanda tangan / Date-Signature

Lampiran 5 Surat Rekomendasi Penelitian dan Permohonan Data Sekunder dari Kepala Bakesbangpol dan Linmas Kota Surabaya



PEMERINTAH KOTA SURABAYA
BADAN KESATUAN BANGSA, POLITIK DAN PERLINDUNGAN MASYARAKAT

Jl. Jaksa Agung Suprpto No. 2 - 4 Telp. (031) 5473284, Fax. 5343000

SURABAYA (60272)

Surabaya, 24 Juni 2015

Kepada

Nomor : 070 / 6447 / 436.7.3 / 2015
Lampiran : -
Hal : Permohonan Data

Yth. 1. Kepala Badan Lingkungan Hidup Kota Surabaya
2. Kepala Dinas Perhubungan Kota Surabaya
3. Kepala Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Surabaya

di -

SURABAYA

REKOMENDASI PENELITIAN

Dasar : 1. Peraturan Menteri Dalam Negeri Nomor 64 Tahun 2011 tentang Pedoman Penerbitan Rekomendasi Penelitian, sebagaimana telah diubah dengan Peraturan Menteri Dalam Negeri Nomor 7 Tahun 2014 tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Dalam Negeri Nomor 64 Tahun 2011 ;
2. Peraturan Walikota Surabaya Nomor 37 Tahun 2011 Tentang Rincian Tugas dan Fungsi Lembaga Teknis Daerah Kota Surabaya, Bagian Kedua Badan Kesatuan Bangsa, Politik dan Perlindungan Masyarakat

Memperhatikan : Surat Ketua Jurusan Teknik Lingkungan FTSP - ITS Surabaya tanggal 03 Juni 2015 Nomor : 23359/IT2.3.1.3/PN.08.02/2015 hal Permohonan Ijin

Kepala Badan Kesatuan Bangsa, Politik dan Perlindungan Masyarakat Kota Surabaya memberikan rekomendasi kepada :

a. Nama : Abdu Fadli Assomadi
b. Alamat : Jl. Sidoagung 62 RT 05 RW 02 Candi Renggo Singosari Malang
c. Pekerjaan/Jabatan : Pegawai Negeri Sipil
d. Instansi/Organisasi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
e. Kewarganegaraan : Indonesia

Untuk melakukan penelitian/survey/kegiatan dengan :

a. Judul / Thema : Pengembangan Model Distribusi Dan Penentuan Kapasitas Pencemar Udara Di Atmosfer Perkotaan
b. Tujuan : Permohonan Data
c. Bidang Penelitian : Teknik Lingkungan
d. Penanggung Jawab : Ir. Eddy S. Soedjono, Dipl., SE., M.Sc., Ph.D
e. Anggota Peserta : -
f. Waktu : 3 (Tiga) Bulan, TMT Surat dikeluarkan
g. Lokasi : Badan Lingkungan Hidup, Dinas Perhubungan, Dinas Kebersihan dan Pertamanan

Dengan persyaratan : 1. Penelitian/survey/kegiatan yang dilakukan harus sesuai dengan surat permohonan dan wajib mentaati persyaratan / peraturan yang berlaku di Lokasi / Tempat dilakukan Penelitian/survey/kegiatan ;
2. Saudara yang bersangkutan agar setelah melakukan Penelitian/survey/kegiatan wajib melaporkan pelaksanaan dan hasilnya kepada Kepala Bakesbang, Politik dan Linmas Kota Surabaya ;
3. Penelitian/survey/kegiatan yang dilaksanakan tidak boleh menimbulkan keresahan dimasyarakat, disintegrasi bangsa atau mengganggu keutuhan NKRI ;
4. Rekomendasi ini akan dicabut / tidak berlaku apabila yang bersangkutan tidak memenuhi persyaratan seperti tersebut diatas.

Demikian atas bantuannya disampaikan terima kasih.



Tembusan :
Yth. 1. Ketua Jurusan Teknik Lingkungan FTSP - ITS
Surabaya

BIODATA PENULIS

Data Personal

Nama : Abdu Fadli Assomadi
Tempat, tanggal lahir : Malang, 18 Oktober 1975
Pekerjaan : Staf Pengajar
Institusi kerja : Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) - Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya
Alamat Institusi : Kampus ITS Sukolilo Surabaya
Alamat Rumah : Pesona Singosari Blok J No 1 Singosari Malang
email : assomadi@its.ac.id
Istri : Qonitah Fardiyah, SSi., MSi.
Anak : Muchammad Najmi Syarif Al-Baihaqi

Pendidikan Formal

1. SDN Dilem 1 Kepanjen Malang, 1982-1988
2. SMPN 2 Kepanjen Malang, 1988-1991
3. SMAN Kepanjen Malang, 1991-1994
4. S-1 Jurusan Kimia, Universitas Brawijaya Malang, 1995-1999
5. S-2 Teknik Lingkungan ITS Surabaya, 2003-2005

Publikasi

1. Assomadi, AF., Widodo, B., Hermana, J., 2016, The Kinetic Approach of NO_x Photoreaction Related to Ground Measurement of Solar Radiation in Estimates of Surface Ozone Concentration, International Journal of ChemTech Research, Vol 9, No. 07, pp 182-190, ISSN: 0974-4290
2. Assomadi, AF., Widodo, B., Hermana, J., 2015, Penentuan Indeks Kecerahan Atmosfer Perkotaan Berdasarkan Data Series Pengukuran Intensitas Radiasi Global Harian (Studi Kasus Kota Surabaya, Indonesia), Seminar Nasional Teknologi Lingkungan XII – ITS, 3 September 2015, ISBN 978-602-73103-0-8
3. Hermana, J., Assomadi, AF., Boedisantoso, R., Dipareza, A., 2015, Pemanfaatan Sifat dan Ketersediaan Data sesuai Karakteristik Kabupaten/Kota untuk Estimasi Emisi Spesifik Karbon, Seminar Nasional Teknologi Lingkungan XII – ITS, 3 September 2015, ISBN 978-602-73103-0-8

