



TUGAS AKHIR - KM184801

**ESTIMASI KONSENTRASI KARBON
MONOKSIDA (CO) DAN NITROGEN DIOKSIDA
(NO₂) PADA PENCEMARAN UDARA DENGAN
MENGUNAKAN *UNSCENTED KALMAN
FILTER***

RENITA DIANAWATI
0611164000062

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si
Drs. Iis Herisman, M.Sc

Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - KM184801

**ESTIMASI KONSENTRASI KARBON
MONOKSIDA (CO) DAN NITROGEN DIOKSIDA
(NO₂) PADA PENCEMARAN UDARA DENGAN
MENGUNAKAN *UNSCENTED KALMAN
FILTER***

**RENITA DIANAWATI
0611164000062**

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si
Drs. Iis Herisman, M.Sc

Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - KM184801

***ESTIMATION OF CARBON MONOXIDE (CO)
AND NITROGEN DIOXIDE (NO₂)
CONCENTRATIONS IN AIR POLLUTION BY
USING UNSCENTED KALMAN FILTER***

**RENITA DIANAWATI
0611164000062**

Supervisor
Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si
Drs. Iis Herisman, M.Sc

Department of Mathematics
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ESTIMASI KONSENTRASI KARBON MONOKSIDA (CO)
DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO₂) PADA PENCEMARAN
UDARA DENGAN MENGGUNAKAN
*UNSCENTED KALMAN FILTER***

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Matematika pada bidang studi Matematika Terapan
Program Studi S-1

Departemen Matematika Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh,
Renita Dianawati
NRP. 0611164000062

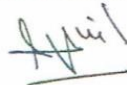
Menyetujui,

Dosen Pembimbing II,



Drs. Iis Herisman, M.Sc
NIP. 19601002 198903 1 002


Dosen Pembimbing I,



Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si
NIP. 19660414 199102 2 001

Mengetahui,
Kepala Departemen Matematika FSAD
ITS




Subchan, Ph.D

NIP. 19710513 199702 1 001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**ESTIMASI KONSENTRASI KARBON MONOKSIDA
(CO) DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO₂) PADA
PENCEMARAN UDARA DENGAN MENGGUNAKAN
*UNSCENTED KALMAN FILTER***

Nama : Renita Dianawati
NRP : 06111640000062
Departemen : Matematika
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Dr. Erna Apriliani,
M.Si
2. Drs. Iis Herisman, M.Sc

ABSTRAK

Pencemaran udara merupakan masalah besar yang sering dihadapi di beberapa negara termasuk di Indonesia. Faktor penyebab pencemaran udara terdiri atas dua jenis sumber yaitu, yang pertama adalah pencemaran akibat sumber alamiah (*natural sources*) seperti letusan gunung berapi dan yang kedua berasal dari kegiatan manusia (*anthropogenic sources*) seperti yang berasal dari transportasi, emisi pabrik, dan lain-lain. Pencemaran udara akibat kegiatan manusia sering terjadi karena pemicu utamanya adalah banyaknya jumlah kendaraan bermotor. Peningkatan yang signifikan dari jumlah kendaraan bermotor dapat mengakibatkan tingginya konsentrasi polutan karena emisi kendaraan bermotor berkontribusi besar terhadap konsentrasi karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) yang merupakan hasil dari gas buangan kendaraan bermotor. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan estimasi konsentrasi karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) pada pencemaran udara di Kota Surabaya menggunakan metode *Unscented Kalman Filter*. Penggunaan metode *Unscented Kalman Filter* dikarenakan metode modifikasi dari *Kalman Filter* ini akan menghasilkan nilai RSME yang lebih kecil dari pada metode *Kalman Filter*. Selain itu, pada penelitian sebelumnya metode *Unscented Kalman Filter* ini juga menghasilkan hasil estimasi yang sangat berkorelasi dengan data

sebenarnya atau mendekati dari data sebenarnya serta hasil estimasi dengan metode ini lebih akurat dari pada menggunakan metode yang lain.

Kata kunci : *Difusi Adveksi, Karbon Monoksida, Nitrogen Dioksida, Pencemaran Udara, Unscented Kalman Filter.*

***ESTIMATION OF CARBON MONOXIDE (CO) AND
NITROGEN DIOXIDE (NO₂) CONCENTRATIONS IN
AIR POLLUTION BY USING UNSCENTED KALMAN
FILTER***

Name : Renita Dianawati
NRP : 06111640000062
Department : Mathematics
Supervisor : 1. Prof. Dr. Erna Apriliani,
M.Si
2. Drs. Iis Herisman, M.Sc

ABSTRACT

Air pollution is a major problem often encountered in some countries including Indonesia. The cause of air pollution consists of two types of sources namely, the first is pollution due to natural sources (natural sources) such as volcanic eruptions and the second comes from human activities (anthropogenic sources) such as those derived from transportation, plant emissions, etc. Air pollution due to human activities often occurs because the main trigger is the large number of motor vehicles. A significant increase of the number of motor vehicles can result in high concentrations of pollutants because the emissions of motor vehicles contributes greatly to the concentration of carbon monoxide (CO) and nitrogen dioxide (NO₂) which is the result of the exhaust gas of the motor vehicle. Therefore, this research will be done estimation of carbon monoxide (CO) and nitrogen dioxide (NO₂) concentrations on air pollution in the city of Surabaya using Unscented Kalman Filter method. The use of the Unscented Kalman Filter method due to the modification method of Kalman Filter will result in a smaller RSME value than the Kalman Filter method. In addition, in previous research this method of Unscented Kalman Filter also produces estimates that heavily correlated with actual data or approaching from actual data as well as the results

of estimation with this method is more accurate than using other methods.

Keywords: Diffusion Advesion, Carbon Monoxide, Nitrogen Dioxide, Air Pollution, Unscented Kalman Filter.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

**”ESTIMASI KONSENTRASI KARBON MONOKSIDA (CO)
DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO₂) PADA PENCEMARAN
UDARA DENGAN MENGGUNAKAN *UNSCENTED
KALMAN FILTER*”**

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Departemen Matematika Fakultas Sains dan Analitika Data Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini tidak lupa penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Subchan, Ph.D selaku Ketua Departemen Matematika FSAD ITS yang telah mendukung penulis menyelesaikan kuliahnya.
2. Ibu Dr. Dwi Ratna Sulistyaningrum, S.Si, MT selaku Sekdep Bidang Akademik S1 Departemen Matematika FSAD ITS yang telah memberikan banyak bantuan dalam pelaksanaan Tugas Akhir.
3. Ibu Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku dosen pembimbing 1 dan Drs. Iis Herisman, M.Sc dosen pembimbing 2 atas segala arahan, dukungan, dan motivasinya kepada penulis, sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Orang tua penulis Moch. Kudori dan Erna Widya Wati serta adik kandung penulis Nabila Shinta Luthfia yang selalu mendoakan dan mendukung penulis selama menempuh perkuliahan di Departemen Matematika ITS.
5. Sahabat penulis yaitu Tri Wahyu Agus Setiorini, Choiriyah Sapta Agustina, Mudharika, Saskia Rizkiana Putri, Rida Eka Nabila, Violeta Nur Chofiyya yang selalu menemani, mendengarkan keluh kesah penulis dan selalu mendukung

- penulis selama menjalani perkuliahan.
6. Partner Tugas Akhir penulis yaitu Sandy Editya Prakosa dan Dita Dwi Lestari yang telah mendengarkan keluh resah penulis dan mendukung penulis selama menjalani perkuliahan dan pengerjaan Tugas Akhir penulis.
 7. Motivator penulis yaitu *Stray Kids* yang sudah memotivasi penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
 8. Semua pihak yang telah membantu saya selama kegiatan kerja praktik sehingga laporan kerja praktik ini dapat selesai dengan baik.

Saya menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Semoga penyusunan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Surabaya, 9 Maret 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABLE.....	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
DAFTAR SIMBOL.....	xxv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	7
2.2 Pencemaran Udara.....	8
2.3 Karbon Monoksida (CO).....	9
2.4 Nitrogen Dioksida (NO ₂).....	9
2.5 Model Matematika Pencemaran Udara dengan Difusi Adveksi 2D.....	10
2.5.1 Difusi	10
2.5.2 Adveksi	11
2.5.3 Kontinuitas Massa	11
2.6 Metode Beda Hingga	14
2.6.1 Pendekatan Beda Maju (<i>Forward Difference</i>).....	15
2.6.2 Pendekatan Beda Pusat (<i>Center Difference</i>)	15
2.7 <i>Kalman Filter</i>	16

2.8	<i>Unscented Kalman Filter</i>	18
2.8.1	Transformasi <i>Unscented</i>	19
2.8.2	Algoritma <i>Unscented Kalman Filter</i>	21
BAB III METODE PENELITIAN		
3.1	Studi Literatur	25
3.2	Pengumpulan Data	25
3.3	Identifikasi Model Pencemaran Udara dan <i>Unscented Kalman Filter</i> (UKF)	25
3.4	Implementasi Metode <i>Unscented Kalman Filter</i>	26
3.5	Simulasi, Analisis Hasil, dan Pembahasan	28
3.6	Penarikan Kesimpulan dan Saran	28
3.7	Penyusunan Laporan Tugas Akhir	28
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Pendiskritan Model Difusi Adveksi 2 Dimensi	31
4.2	Pembentukan Matriks Koefisien Pengukuran	34
4.3	Tes Keteramatan (<i>Observability</i>)	36
4.4	Sistem Dinamik Stokastik	37
4.5	Implementasi Algoritma <i>Unscented Kalman Filter</i>	37
4.5.1	Tahap Inisialisasi	40
4.5.2	Tahap Prediksi	44
4.5.3	Tahap Koreksi	45
4.6	Analisis Hasil Simulasi <i>Unscented Kalman Filter</i>	46
4.6.1	Simulasi dan Analisa Pembahasan Estimasi Karbon Monoksida (CO) dengan Data Pengukuran	47
4.6.2	Simulasi dan Analisa Pembahasan Estimasi Nitrogen Dioksida (NO ₂) dengan Data Pengukuran	63
4.6.3	Simulasi dan Analisa Pembahasan Estimasi CO dan NO ₂ Tanpa Data Pengukuran	78
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	93
5.2	Saran	94
DAFTAR PUSTAKA		95
LAMPIRAN		97

BIODATA PENULIS175

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sumbu x, y, dan z	12
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 Diagram Metode <i>Unscented Kalman Filter</i>	30
Gambar 4.1 Lokasi Penempatan Alat Ukur Pencemaran Udara di Kota Surabaya.....	35
Gambar 4.2 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam	50
Gambar 4.3 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam	51
Gambar 4.4 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam	51
Gambar 4.5 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam	52
Gambar 4.6 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam	53
Gambar 4.7 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam	53
Gambar 4.8 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam	54
Gambar 4.9 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam	55
Gambar 4.10 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam	55
Gambar 4.11 Grafik Error Estimasi Konsentrasi CO pada	

	SUF1 (Kebonsari)	56
Gambar 4.12	Grafik Error Estimasi Konsentrasi CO pada SUF6 (Wonorejo).....	57
Gambar 4.13	Grafik Error Estimasi Konsentrasi CO pada SUF7 (Ketabang Kali)	57
Gambar 4.14	Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan CO pada Waktu ke-2.....	58
Gambar 4.15	Plot Kontur Penyebaran Polutan CO pada Waktu ke-2	59
Gambar 4.16	Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan CO pada Waktu ke-50.....	60
Gambar 4.17	Plot Kontur Penyebaran Polutan CO pada Waktu ke-50	60
Gambar 4.18	Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan CO pada Waktu ke-100.....	61
Gambar 4.19	Plot Kontur Penyebaran Polutan CO pada Waktu ke-100	62
Gambar 4.20	Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam	65
Gambar 4.21	Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam	66
Gambar 4.22	Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam	66
Gambar 4.23	Grafik Estimasi Konsentrasi Nitrogen Dioksida (NO ₂) pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam	67
Gambar 4.24	Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam	68
Gambar 4.25	Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam	68

Gambar 4.26 Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam	69
Gambar 4.27 Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam	70
Gambar 4.28 Grafik Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam	70
Gambar 4.29 Grafik Error Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF1 (Kebonsari)	71
Gambar 4.30 Grafik Error Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF6 (Wonorejo).....	72
Gambar 4.31 Grafik Error Estimasi Konsentrasi NO ₂ pada SUF7 (Ketabang Kali)	72
Gambar 4.32 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan NO ₂ pada Waktu ke-2.....	73
Gambar 4.33 Plot Kontur Penyebaran Polutan NO ₂ pada Waktu ke-2.....	74
Gambar 4.34 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan NO ₂ pada Waktu ke-50.....	75
Gambar 4.35 Plot Kontur Penyebaran Polutan NO ₂ pada Waktu ke-50.....	75
Gambar 4.36 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan NO ₂ pada Waktu ke-100.....	76
Gambar 4.37 Plot Kontur Penyebaran Polutan NO ₂ pada Waktu ke-100.....	77
Gambar 4.38 Titik Koordinat Lokasi Tanpa Alat Ukur Pencemaran Udara di Kota Surabaya	79
Gambar 4.39 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Tanpa Data Pengukuran	80
Gambar 4.40 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Daerah Terminal Joyoboyo	82
Gambar 4.41 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Daerah Stasiun Gubeng	82

Gambar 4.42 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Daerah Arif Rahman Hakim	83
Gambar 4.43 Grafik Error Estimasi Konsentrasi CO Daerah Terminal Joyoboyo	84
Gambar 4.44 Grafik Error Estimasi Konsentrasi CO Daerah Stasiun Gubeng	84
Gambar 4.45 Grafik Error Estimasi Konsentrasi CO Daerah Arif Rahman Hakim	85
Gambar 4.46 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO ₂ Tanpa Data Pengukuran	86
Gambar 4.47 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO ₂ Daerah Terminal Joyoboyo	88
Gambar 4.48 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO ₂ Daerah Stasiun Gubeng	88
Gambar 4.49 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO ₂ Daerah Arif Rahman Hakim	89
Gambar 4.50 Grafik Error Estimasi Konsentrasi NO ₂ Daerah Terminal Joyoboyo	90
Gambar 4.51 Grafik Error Estimasi Konsentrasi NO ₂ Daerah Stasiun Gubeng	90
Gambar 4.52 Grafik Error Estimasi Konsentrasi NO ₂ Daerah Arif Rahman Hakim	91

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Algoritma Kalman Filter (KF).....	18
Tabel 2.2 Algoritma <i>Unscented Kalman Filter</i> (UKF).....	22
Tabel 4.1 Kondisi Awal Masing-Masing Parameter	47
Tabel 4.2 Kondisi Awal Konsentrasi Polutan CO	48
Tabel 4.3 <i>RMSE Unscented Kalman Filter</i> Polutan CO	48
Tabel 4.4 Kondisi Awal Konsentrasi Polutan NO ₂	63
Tabel 4.5 <i>RMSE Unscented Kalman Filter</i> Polutan NO ₂	64
Tabel 4.6 Estimasi Konsentrasi Tertinggi Polutan CO pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran	81
Tabel 4.7 Estimasi Konsentrasi Terendah Polutan CO pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran	81
Tabel 4.8 Estimasi Konsentrasi Tertinggi Polutan NO ₂ pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran	87
Tabel 4.9 Estimasi Konsentrasi Terendah Polutan NO ₂ pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran	87

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data awal konsentrasi polutan Karbon Monoksida (CO) dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7)97
Lampiran 2	Data awal konsentrasi polutan Nitrogen Dioksida (NO ₂) dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7)101
Lampiran 3	Perbandingan hasil estimasi konsentrasi polutan Karbon monoksida (CO) dengan data real (data pengukuran) dengan menggunakan metode <i>Unscented Kalman Filter</i> pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7)105
Lampiran 4	Perbandingan hasil estimasi konsentrasi polutan Nitrogen Dioksida (NO ₂) dengan data real (data pengukuran) dengan menggunakan metode <i>Unscented Kalman Filter</i> pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7)117
Lampiran 5	<i>Source Code</i> mengecek keterampilan model pencemaran udara.....129
Lampiran 6	<i>Source Code</i> fungsi program <i>Unscented Kalman Filter</i>131
Lampiran 7	<i>Source Code</i> estimasi konsentrasi polutan CO menggunakan <i>Unscented Kalman Filter</i> dengan data pengukuran.....135
Lampiran 8	<i>Source Code</i> estimasi konsentrasi polutan NO ₂ menggunakan <i>Unscented Kalman Filter</i> dengan data pengukuran.....147
Lampiran 9	<i>Source Code</i> estimasi konsentrasi polutan CO

	menggunakan <i>Unscented Kalman Filter</i> dengan tanpa data pengukuran.	159
Lampiran 10	<i>Source Code</i> estimasi konsentrasi polutan NO ₂ menggunakan <i>Unscented Kalman Filter</i> dengan tanpa data pengukuran.	167

DAFTAR SIMBOL

J_{Difusi}	: Flux perpindahan difusi massa kearah sumbu-x
$\frac{dC}{dx}$: Gradient konsentrasi ke arah sumbu-x
$J_{Adveksi}$: Flux perpindahan adveksi massa kearah sumbu-x
n_e	: Porositas efektif (nilainya antara 0 atau 1)
$C((x, y), t)$: Konsentrasi polutan CO dan NO_2
D_x	: Koefisien difusi pada arah x
D_y	: Koefisien difusi pada arah y
U_x	: Kecepatan angin dalam arah x
U_y	: Kecepatan angin dalam arah y
x_{k+1}	: Variable keadaan pada $k + 1$
P_{k+1}^-	: Kovarian <i>error</i> tahap prediksi saat $k + 1$
\hat{x}_{k+1}^-	: Estimasi keadaan tahap prediksi saat $k + 1$
\hat{x}_{k+1}	: Estimasi keadaan tahap koreksi saat $k + 1$
P_{k+1}	: Kovarian <i>error</i> tahap koreksi saat $k + 1$
x_k	: Variabel keadaan pada saat k
z_k	: Variabel pengukuran
u_k	: Input proses
w_k	: Vektor <i>noise</i> pada sistem
v_k	: Vektor <i>noise</i> pada pengukuran
G_k	: Matriks koefisien <i>noise</i> sistem
Q_k	: Kovarian <i>noise</i> sistem
R_k	: Kovarian <i>noise</i> pengukuran
k	: Waktu diskrit
\hat{x}_0^a	: <i>Mean</i> pada tahap inisialisasi
\hat{P}_0^a	: Kovarian pada tahap inisialisasi
$X_{k k-1}^x$: Fungsi awal pada tahap prediksi
\hat{x}_k^-	: Nilai estimasi pada tahap prediksi
\hat{x}_k	: Nilai estimasi pada tahap koreksi
X_{k-1}^a	: Matriks <i>sigma points</i>

H	: Matriks Jacobi
L	: Dimensi state tambahan
N	: Distribusi normal
P_k^-	: Kovarian <i>error</i> tahap prediksi saat k
P_{xk}	: Kovarian <i>error</i> pada tahap koreksi
$W_i^{(m)}$: Bobot pada <i>mean</i>
$W_i^{(c)}$: Bobot pada kovarian
K_{k+1}	: Kalman gain pada <i>Kalman Filter</i>
K_k	: Kalman gain pada <i>Unscented Kalman Filter</i>
λ	: Parameter penskalaan
α	: Konstanta yang digunakan untuk sebaran dari titik sigma disekitar ($0 \leq \alpha \leq 1$) atau selalu bernilai positif yang kecil
k	: Skala tambahan, dimana nilai $k \geq 0$. Nilai yang paling sering digunakan adalah $k = 0$

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang dari permasalahan yang diangkat pada Tugas Akhir. Kemudian akan dijabarkan dalam rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan manfaat yang diambil dari penyusunan Tugas Akhir.

1.1 Latar Belakang

Pencemaran udara merupakan masalah di beberapa negara termasuk di Indonesia. Di Indonesia sendiri, tingkat pencemaran udaranya semakin lama semakin memprihatinkan. Menurut Peraturan Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara pengertian dari pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya [1]. Terdapat 13 parameter jenis polutan yang merupakan udara ambien yaitu: nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), sulfur dioksida (SO_2), ozon (O_3), partikel yang berukuran ≤ 10 mikron (PM_{10}), partikel yang berukuran ≤ 2.5 mikron ($\text{PM}_{2.5}$), total suspended particulate/debu (TSP), timah hitam (Pb), dustfall (debu jatuh), total fluorides (asF), fluor indeks, khlorine & khlorine dioksida, serta sulphat indeks. Untuk mengetahui apakah suatu udara tercemar atau tidak digunakan suatu standar kualitas udara Baku Mutu Udara Ambien (BMUA) di dalam peraturan pemerintah tentang Pengendalian Pencemaran Udara yang tertuang dalam PP Nomor 41 tahun 1999. Jika konsentrasi suatu polutan dalam udara ambien melampaui nilai baku mutunya, maka dinyatakan udara telah tercemar.

Faktor penyebab pencemaran udara ada dua jenis sumber yaitu, yang pertama adalah pencemaran akibat sumber alamiah (*natural sources*) seperti letusan gunung berapi dan yang kedua

berasal dari kegiatan manusia (*anthropogenic sources*) seperti yang berasal dari transportasi, emisi pabrik, dan lain-lain [2]. Pencemaran udara yang bersumber dari kegiatan manusia sering kali terjadi di daerah perkotaan maupun daerah pabrik. Pemicu utama dari pencemaran udara adalah banyaknya jumlah kendaraan bermotor. Data mengungkapkan bahwa 60% - 70% pencemaran udara di Indonesia disebabkan karena benda bergerak atau transportasi umum salah satunya kendaraan bermotor [2]. Jumlah Kendaraan di Indonesia setiap tahunnya selalu mengalami kenaikan. Menurut Badan Pusat Statistika, jumlah kendaraan bermotor dari tahun 2015 sebanyak 121.394.185 menjadi 129.281.079 pada tahun 2016 dan 138.556.669 pada tahun 2017. Di Kota Surabaya, menurut Badan Litbang Provinsi Jawa Timur jumlah kendaraan bermotor rata-rata mengalami peningkatan sebesar 7,03 % per tahun, dari 1.944.802 kendaraan tahun 2015 menjadi 2.081.449 kendaraan pada tahun 2016 dan 2.159.069 kendaraan pada tahun 2017. Peningkatan yang signifikan dari jumlah kendaraan bermotor dapat mengakibatkan tingginya konsentrasi polutan karena emisi kendaraan bermotor berkontribusi besar terhadap konsentrasi karbon monoksida (CO) di udara yang jumlahnya lebih dari 50% [2]. Jumlah karbon monoksida (CO) yang melebihi ambang baku mutu lingkungan dapat memberikan dampak negatif pada kesehatan manusia, khususnya mengurangi pengangkutan oksigen dalam darah [3]. Selain karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂) juga merupakan hasil dari gas buangan kendaraan bermotor. Jumlah NO₂ yang melebihi ambang baku mutu akan menimbulkan dampak terhadap kesehatan terutama adalah penurunan fungsi paru, menyebabkan sesak napas, bahkan berujung pada kematian [4].

Oleh karena itu, untuk mengetahui kualitas udara di suatu wilayah tercemar polusi udara atau tidak maka pendeteksian kualitas udara atau kadar polutan yang ada di suatu wilayah perlu dilakukan pengukuran estimasi konsentrasi polutan. Pengukuran konsentrasi polutan biasanya diukur dengan menggunakan alat

pengukur kualitas udara untuk mengetahui banyaknya polutan di suatu tempat. Namun sering kali alat tersebut rusak atau tidak semua tempat terdapat alat pengukur kualitas udara, sehingga perlu dilakukan estimasi konsentrasi penyebaran polutan di tempat yang tidak terdapat alat pengukur kualitas udara di Surabaya agar dapat diketahui tingkat pencemaran udara di tempat tersebut, sehingga dapat digunakan untuk menentukan langkah-langkah pengurangannya atau penanggulangannya. Menurut penelitian yang sudah dilakukan oleh Erna Apriliani dkk pada tahun 2011 mengenai “Metode estimasi penyebab polutan di udara (*Estimation methods for air pollution distribution*)” menggunakan tiga metode yang berbeda, yaitu metode numerik (metode *Euler* dan *Runge Kutta*), metode *Recursive Least Square* (RLS), dan metode asimilasi atau *Kalman Filter*. Dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode *Kalman Filter* merupakan metode yang terbaik dari dua metode lainnya [3]. Pada tahun 2020, penelitian tentang estimasi polutan juga dilakukan oleh Santanu Metia dkk yang berjudul *pollutant profile estimation using Unscented Kalman Filter*. Dalam penelitian tersebut dilakukan perbandingan hasil estimasi terhadap polutan karbon monoksida (CO) dengan menggunakan metode *Extended Kalman Filter* dan *Unscented Kalman Filter* yang hasilnya menyatakan bahwa hasil estimasi dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* sangat berkoleransi dengan data yang berada pada stasiun pemantau atau mendekati data dari stasiun pemantau dan hasil estimasi dengan metode *Unscented Kalman Filter* lebih akurat daripada menggunakan metode *Extended Kalman Filter* [5].

Pada penelitian ini akan dilakukan pengukuran estimasi konsentrasi karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) pada pencemaran udara di Kota Surabaya dengan menggunakan metode modifikasi dari *Kalman Filter* yaitu metode *Unscented Kalman Filter*. Pemilihan metode menggunakan *Unscented Kalman Filter* dikarenakan pada penelitian sebelumnya metode ini menghasilkan hasil estimasi yang mendekati data sebenarnya dan dinilai lebih akurat dari pada menggunakan metode yang lain.

Penelitian ini perlu dilakukan agar dapat diketahui tingkat pencemaran udara di seluruh lokasi Kota Surabaya yang belum terdapat alat ukur kualitas udara, sehingga dapat digunakan untuk menentukan langkah-langkah pengurangan pencemaran udara di Kota Surabaya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pemodelan matematika penyebaran polutan karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) dengan persamaan Difusi dan Adveksi ?
2. Bagaimana hasil estimasi konsentrasi karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter*?
3. Bagaimana hasil akurasi estimasi konsentrasi karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) menggunakan metode *Unscented Kalman Filter*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya tahun 2018.
2. Polutan yang diamati adalah karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂).

1.4 Tujuan

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui model matematika dari penyebaran polutan karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂).
2. Mengetahui estimasi konsentrasi karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) pada titik-titik tertentu yang

tidak terdapat alat pengukur kualitas udara di Kota Surabaya dengan metode *Unscented Kalman Filter*.

3. Mengetahui kelebihan hasil perhitungan estimasi konsentrasi karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) dengan metode *Unscented Kalman Filter*.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai sumber informasi bagi pemerintah Kota Surabaya tentang konsentrasi polutan di titik-titik tertentu yang tidak terdapat alat pengukur kualitas udara di Kota Surabaya, sehingga dapat diambil langkah antisipasi untuk mengurangi tingkat pencemaran udara.
2. Memberi informasi untuk penelitian selanjutnya tentang estimasi konsentrasi polutan pada masalah pencemaran udara dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi tentang teori dasar sebagai pendukung dalam Tugas Akhir ini, yaitu mengenai penelitian-penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan estimasi konsentrasi pencemaran udara, penjelasan mengenai pencemaran udara, karbon monoksida, dan nitrogen dioksida menggunakan metode Beda Hingga, metode *Kalman Filter* dan metode *Unscented Kalman Filter*.

2.1 Penelitian sebelumnya

Estimasi pencemaran udara sudah banyak dilakukan pada penelitian sebelumnya dengan menggunakan berbagai metode yang berbeda, antara lain :

1. “Metode estimasi penyebab polutan di udara (*Estimation methods for air pollution distribution*)” tahun 2011 oleh Erna Apriliani dkk. Kesimpulan dari penelitian ini adalah metode numerik (metode Euler dan Runge Kutta) kurang tepat digunakan untuk menghitung estimasi sesuai kondisi nyata yang sangat bervariasi. Selain itu, jika perhitungan estimasinya menggunakan metode *Recursive Least Square* (RLS) membutuhkan data konsentrasi polutan terurut yang cukup banyak pada posisi tertentu dan hanya dapat digunakan untuk mengestimasi pada satu posisi saja. Sedangkan dengan menggunakan metode asimilasi atau *Kalman Filter*, data yang digunakan untuk estimasi konsentrasi polutan dapat menggunakan data yang jauh lebih sedikit dan tidak perlu data terurut untuk waktu yang panjang tetapi satu waktu sebelumnya serta dapat mengestimasi untuk banyak lokasi sesuai yang diinginkan [3].

2. “*Pollutant Profile Estimation Using Unscented Kalman Filter*” pada tahun 2020, penelitian tentang estimasi polutan juga dilakukan oleh Santanu Metia dkk. Dalam penelitian tersebut dilakukan perbandingan hasil estimasi terhadap polutan karbon monoksida (CO) dengan menggunakan metode *Extended Kalman Filter* dan *Unscented Kalman Filter* yang hasilnya menyatakan bahwa hasil estimasi dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* sangat berkorelasi dengan data yang berada pada stasiun pemantau atau mendekati data dari stasiun pemantau dan hasil estimasi dengan metode *Unscented Kalman Filter* lebih akurat daripada menggunakan metode *Extended Kalman Filter*. Selain itu *Unscented Kalman Filter* juga memiliki efisiensi yang tinggi dalam mengestimasi konsentrasi polutan [5].

2.2 Pencemaran Udara

Menurut Peraturan Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Pencemaran udara adalah zat yang masuk (udara tercemar), energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Penyebab pencemaran udara terdiri dari dua jenis yaitu pencemaran udara akibat sumber alamiah seperti letusan gunung berapi dan pencemaran udara akibat kegiatan manusia seperti emisi pabrik, transportasi dan lain sebagainya [1]. Untuk satuan dari polutan dalam satuan SI adalah $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Baku Mutu Udara Ambien (BMUA) Nasional terdapat 13 parameter jenis polutan umum yaitu: nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), sulfur dioksida (SO_2), ozon (O_3), partikel yang berukuran ≤ 10 mikron (PM_{10}), partikel yang berukuran ≤ 2.5 mikron ($\text{PM}_{2.5}$), total suspended particulate/debu (TSP), timah hitam (Pb), dustfall (debu jatuh),

total fluorides (asF), fluor indeks, khlorine & khlorine dioksida, serta sulphat indeks [1]. Pengertian baku mutu udara ambien adalah ukuran batas atau kadar zat, energi, dan atau komponen yang ada atau yang seharusnya ada dan atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam udara ambien. Tidak semua jenis polutan yang berada pada baku mutu udara ambien nasional yang diemisi ke udara dapat menimbulkan dampak penting atau efek samping. Jika laju emisi yang dikeluarkan oleh polutan kecil atau dalam durasi pemunculannya singkat, maka suatu emisi polutan kemungkinan besar tidak akan terlalu mempengaruhi kualitas udara ambien yang signifikan.

2.3 Karbon Monoksida (CO)

Persentase pencemaran udara dari sumber transportasi di Indonesia adalah 70,50% CO; 18,34% HC; 8,89% NO_x; 0,88% SO_x; 1,33% partikel [6]. Di Surabaya, penyumbang sumber karbon monoksida terbesar adalah kendaraan bermotor yang mayoritas menggunakan bahan bakar bensin, pembakaran batubara dan minyak dari industri. Menurut WHO pada tahun 1992 menyatakan bahwa 90% dari karbon monoksida di udara perkotaan berasal dari emisi kendaraan bermotor. Jumlah karbon monoksida (CO) yang melebihi ambang baku mutu lingkungan dapat memberikan dampak negatif pada kesehatan manusia, khususnya mengurangi pengangkutan oksigen dalam darah [3]. Menurut Peraturan Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Baku mutu udara ambien nasional karbon monoksida dalam waktu pengukuran 1 jam adalah 30.000 ug/Nm³ dan waktu pengukuran 24 jam memiliki baku mutu 10.000 ug/Nm³ [1].

2.4 Nitrogen Dioksida (NO₂)

Gas NO₂ menimbulkan bau, berwarna kuning pucat oleh karena itu dapat mengganggu jarak pandang, dan dapat

menimbulkan iritasi pada saluran nafas atau gangguan pernapasan pada konsentrasi 1,5–2,0 ppm [7]. Padahal Menurut Badan Pengendalian Dampak Lingkungan. Sumber utama emisi gas NO_2 pada umumnya 73 % berasal dari kendaraan bermotor [9]. Jumlah NO_2 yang melebihi ambang baku mutu akan menimbulkan dampak terhadap kesehatan terutama adalah penurunan fungsi paru, menyebabkan sesak napas, bahkan berujung pada kematian [4]. Menurut Peraturan Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Baku mutu udara ambien nasional nitrogen dioksida dalam waktu pengukuran 1 jam adalah 400 ug/Nm^3 dan waktu pengukuran 24 jam memiliki baku mutu 150 ug/Nm^3 serta dalam waktu pengukuran 1 tahun memiliki baku mutu 100 ug/Nm^3 [1].

2.5 Model Matematika Pencemaran Udara dengan Difusi Adveksi 2D

Model pencemaran udara difusi adveksi menggunakan teori perpindahan massa. Karena partikel polutan karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO_2) diudara melalui proses difusi dan adveksi. Proses difusi dan adveksi sangat berpengaruh pada pergerakan molekul di atmosfer. Kedua proses tersebut yang menyebabkan terjadinya perubahan aliran per satuan luas penampang (permukaan ruang kontrol) per satuan waktu. atau biasa disebut sebagai flux. Peranan persamaan model difusi adveksi sangat penting karena berguna untuk memprediksi besarnya konsentrasi polutan. Keunggulan model ini adalah proses perhitungan yang cepat dan dapat melakukan validasi untuk daerah yang luas.

2.5.1 Difusi

Difusi adalah perpindahan molekul zat dari konsentrasi udara tertinggi ke konsentrasi udara terendah. Proses difusi

diasumsikan mengikuti hukum Fick's yang menghasilkan flux difusi yaitu [9] :

$$J_{Difusi} = -D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.1)$$

dimana :

J_{Difusi} = Flux perpindahan difusi massa kearah sumbu-x

D_x = Koefisien difusi pada arah-x

$\frac{dC}{dx}$ = Gradient konsentrasi ke arah sumbu-x

Pada persamaan diatas terdapat tanda negatif yang menunjukkan bahwa perpindahan massa yang terjadi dari daerah konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah.

2.5.2 Adveksi

Adveksi adalah pergerakan molekul polutan di atmosfer yang dipengaruhi oleh kecepatan angin. Persamaan laju perpindahan adveksi atau flux adveksi yaitu [9]:

$$J_{Adveksi} = n_e U_x C \quad (2.2)$$

dimana :

$J_{Adveksi}$ = Flux perpindahan adveksi massa kearah sumbu-x

U_x = Kecepatan aliran pada arah-x

n_e = Porositas efektif

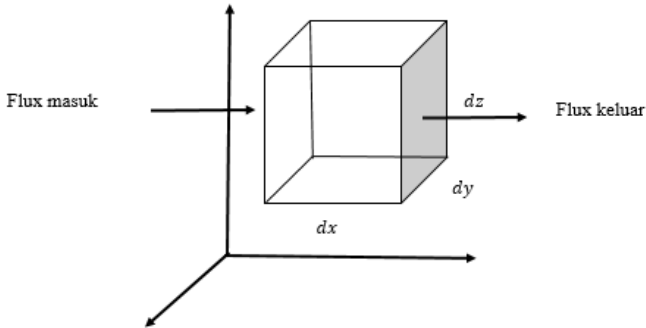
C = Konsentrasi zat

Pada persamaan diatas terdapat n_e (porositas efektif) yang merupakan ukuran dari ruang kosong di antara material, dan merupakan fraksi dari volume ruang kosong terhadap total volume, yang bernilai antara 0 dan 1. Disini nilai dari n_e dimisalkan bernilai 1.

2.5.3 Kontinuitas Massa

Menurut Hukum Kekekalan Massa yang menyatakan bahwa massa tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dihilangkan, sehingga massa pada suatu sistem adalah konstan atau nol. Laju

perubahan flux dari ruang udara atau ruang kontrol adalah perubahan flux terhadap sumbu x dikali massa (ruang balok sumbu x, y, z seperti gambar dibawah ini). Didefinisikan ruang kontrol $dx \times dy \times dz$ sebagai berikut [9]:



Gambar 2.1 Sumbu $x, y,$ dan z

Sehingga diperoleh :

Laju Perubahan Flux	=	Jumlah Flux Masuk	-	Jumlah Flux Keluar
---------------------	---	-------------------	---	--------------------

Maka berdasarkan **Gambar 2.1** didapat flux masuk adalah $J_x dydz$ dan flux keluar adalah $(J_x + \frac{\partial J}{\partial x} dx) dydz$.

Untuk memperoleh total flux per satuan volume pada arah- x per satuan waktu diperoleh dari persamaan (2.1) dan (2.2) dengan sebagai berikut :

$$J_x = U_x C - D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.3)$$

Karena menggunakan model difusi adveksi 2D maka model didapat dari laju perubahan flux = $J_x dydz$ (flux masuk) - $(J_x + \frac{\partial J}{\partial x} dx) dydz$ (flux keluar). Karena model 2 dimensi dan flux menembus pada arah x atau sumbu x maka dz diubah menjadi dx . Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial C}{\partial t} dx dy = [J_x dy + J_y dx] - \left[\left(J_x + \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right) dy + \left(J_y + \frac{\partial J_y}{\partial y} dy \right) dx \right]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} dx dy = - \left[\frac{\partial J_x}{\partial x} dx dy + \frac{\partial J_y}{\partial y} dx dy \right]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} dx dy = - \left[\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} \right] dx dy$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \left[\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} \right] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (J_x) + \frac{\partial}{\partial y} (J_y) \right] \quad (2.5)$$

Dengan keterangan J_x adalah flux pada arah-x dan J_y adalah flux pada arah-y. Kemudian substitusi persamaan (2.3) ke (2.5) didapat model matematika pencemaran udara Difusi Adveksi :

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= - \left[\frac{\partial}{\partial x} (J_x) + \frac{\partial}{\partial y} (J_y) \right] \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(U_x C - D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(U_y C - D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} - U_x C \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} - U_y C \right) \end{aligned}$$

Model pencemaran udara Difusi Adveksi 2D:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \left[\frac{\partial}{\partial x} (U_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (U_y C) \right] \right] \quad (2.6)$$

Dengan syarat batas :

$$C((x, y), 0) = 0, \quad x > 0, y > 0 ;$$

$$C((x, y), t) = C_t, \quad t > 0 ;$$

$$C((\infty, \infty), t) = 0, \quad t > 0$$

keterangan :

$C((x, y), t)$ = Konsentrasi zat polutan CO dan NO_2
dalam posisi x dan y dengan waktu t

D_x = Koefisien difusi pada arah x

D_y = Koefisien difusi pada arah y

U_x = Kecepatan angin dalam arah x

U_y = Kecepatan angin dalam arah y

2.6 Metode Beda Hingga

Sebelum dilakukan estimasi terhadap konsentrasi polutan karbon monoksida CO dan nitrogen dioksida NO_2 maka model pencemaran udara yaitu model difusi adveksi perlu dilakukan pendiskritan model. Pendiskritan model dilakukan dengan menggunakan metode beda hingga. Metode beda hingga adalah numerik yang umum digunakan untuk menyelesaikan persoalan teknis dan problem matematis dari suatu gejala fisis. Dalam metode beda hingga terdapat 3 pendekatan beda hingga yaitu pendekatan beda maju (*forward difference*), pendekatan beda mundur (*backward difference*), dan pendekatan beda pusat (*center difference*).

Pada pendiskritan model pencemaran udara hanya menggunakan metode beda hingga maju (*forward difference*) dan metode beda hingga pusat (*center difference*) sebagai berikut:

2.6.1 Pendekatan beda maju (*forward difference*)

Pendekatan beda maju digunakan dalam proses pendiskritan dengan variable keadaan terhadap waktu. Dalam penelitian ini, pergerakan konsentrasi polutan karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO_2) didiskritkan dengan menggunakan pendekatan beda maju (*forward difference*). Model pencemaran udara berbentuk sistem dinamik dengan variabel keadaan C . Untuk menyederhanakan penulisan, sering dituliskan dengan notasi indeks sebagai berikut [10]:

$$C(x, y, t) \sim C_{i,j}^k$$

$C(x, y, t) \sim C(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta t) \sim C_{i,j}^k$ dimana $t \approx k\Delta t$ dan nilai dari $k = 1, 2, 3, \dots$

Sehingga dari index diatas, diperoleh diskritisasi di titik i, j

$$C(x, y, t) = \frac{C_{i,j}^{k+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t}$$
$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{i,j}^{k+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} \quad (2.7)$$

2.6.2 Pendekatan beda pusat (*center difference*)

Pendekatan beda pusat digunakan dalam proses pendiskritan model pencemaran udara. Model pencemaran udara berbentuk sistem dinamik dengan variabel keadaan C . Pendekatan beda pusat digunakan untuk pendiskritan terhadap posisi x dan posisi y [10].

Pendiskritan terhadap posisi x

$$\frac{\partial C}{\partial x} \approx \frac{C_{i+1,j}^k - C_{i-1,j}^k}{2\Delta x} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{C_{i+1,j}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i-1,j}^k}{(\Delta x)^2} \quad (2.9)$$

Pendiskritan terhadap posisi y

$$\frac{\partial C}{\partial y} \approx \frac{C_{i,j+1}^k - C_{i,j-1}^k}{2\Delta y} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx \frac{C_{i,j+1}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} \quad (2.11)$$

2.7 Kalman Filter (KF)

Metode Kalman Filter diperkenalkan pertama kali oleh R.E. Kalman pada tahun 1960. Kalman Filter merupakan sebuah algoritma pengolahan data yang optimal. Kalman Filter merupakan suatu estimator sistem dinamik linear. Kalman filter mampu mengestimasi variabel keadaan dinamis dari sistem dengan dua tahapan yaitu tahap prediksi dan tahap koreksi. Tahap prediksi (time update) merupakan tahap estimasi dari sistem model dinamik, sedangkan tahap koreksi (measurement update) merupakan tahap estimasi dari model pengukuran. Algoritma Kalman Filter waktu diskrit yang ditulis sebagai berikut [11]:

Model sistem :

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + G_k w_k \quad (2.12)$$

Dengan x_{k+1} merupakan variable keadaan pada $k + 1$, x_k merupakan vektor keadaan pada k , u_k merupakan vektor masukan, w_k merupakan gangguan pada pengukuran merupakan *noise* sistem dan A_k, B_k, G_k adalah matriks koefisien dari masukan dengan ukuran bersesuaian.

Model Pengukuran :

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2.13)$$

dengan :

z_k :Vektor pengukuran
 v_k :Vektor random merupakan *noise* pengukuran

H_k :Matriks koefisien dari masukan dengan ukuran bersesuaian

Dengan asumsi :

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}), w_k \sim N(0, Q_k), v_k \sim N(0, R_k) \quad (2.14)$$

Dimana $w_k \sim N(0, Q_k)$ dan $v_k \sim N(0, R_k)$ adalah proses *white noise* yang tidak berkorelasi dengan x_0 dan yang lainnya $R_k > 0$.

Inisialisasi :

$$\begin{aligned} \hat{x}_0 &= \bar{x}_0 \\ P_0 &= P_{x_0} \end{aligned}$$

Tahap Prediksi (*time update*) :

Estimasi :

$$\hat{x}_{k+1}^- = A_k \hat{x}_k + B_k u_k \quad (2.15)$$

Kovarian Error :

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + G_k Q_k G_k^T \quad (2.16)$$

Dimana \hat{x}_{k+1}^- merupakan vektor prediksi dan P_{k+1}^- merupakan kovarian prediksi. Tahap prediksi yaitu memprediksi variabel keadaan dan tingkat akurasiya dihitung menggunakan persamaan kovarian error atau norm kovariansi error. Pada tahap koreksi, hasil estimasi variabel keadaan dikoreksi menggunakan model pengukuran. Salah satu bagian dari tahap ini yaitu menentukan matriks Kalman Gain yang digunakan untuk meminimumkan kovariansi error [11].

Tahap Koreksi (*measurement update*):

Kalman Gain :

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- H^T (H P_{k+1}^- H^T)^{-1} \quad (2.17)$$

Estimasi :

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1}^- + P_{k+1} H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1}^-) \quad (2.18)$$

Kovarian Error :

$$[(P_{k+1}^-)^{-1} + H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} H_{k+1}]^{-1} \quad (2.19)$$

Tahap prediksi dan tahap koreksi akan diulang terus menerus sampai waktu k yang ditentukan. Algoritma *Kalman Filter* disajikan pada **Tabel 2.1** [11] :

Tabel 2.1 Algoritma Kalman Filter (KF)

Model Sistem	$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + G_k w_k$
Model Pengukuran	$z_k = H_k x_k + v_k$
Asumsi	$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x0}), w_k \sim N(0, Q_k), v_k \sim N(0, R_k)$
Inisialisasi	$\hat{x}_0 = \bar{x}_0$ $P_0 = P_{x0}$
Tahap Prediksi	Estimasi : $\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k$ Kovarian Error : $P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + G_k Q_k G_k^T$
Tahap Koreksi	<i>Kalman Gain</i> : K_{k+1} $= P_{k+1}^- H^T (H P_{k+1}^- H^T)^{-1}$ <i>Estimasi</i> : $\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1} + P_{k+1} H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1}$ $(z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1})$ <i>Kovarian Error</i> : P_{k+1} $= [(P_{k+1}^-)^{-1}$ $+ H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} H_{k+1}]^{-1}$

2.8 Unscented Kalman Filter (UKF)

Unscented Kalman Filter merupakan suatu pengembangan atau modifikasi dari *Kalman Filter* untuk sistem yang non linier dan teknik linearisasinya berdasarkan turunan statistik yaitu dengan Transformasi *Unscented*. *Unscented Kalman Filter*

merupakan perluasan dari Transformasi *Unscented* pada estimasi [12].

2.8.1 Transformasi *Unscented*

Transformasi *Unscented* adalah metode yang digunakan untuk menghitung *mean* dan kovarian suatu variable random yang mengalami transformasi nonlinear [12].

Misal diberikan suatu fungsi kepadatan peluang diskrit $y_k = f(x_k, \kappa)$ mempunyai variable *random* x dari sebuah model nonlinear dengan dimensi L , *mean* \hat{x} dan kovarian P_x . Fungsi $y_k = f(x_k, \kappa)$ didekati dengan Transformasi *Unscented*. Kemudian *mean* dan kovarian tersebut digunakan untuk menentukan penyebaran $2L + 1$ titik-titik sigma di sekitar \hat{x} . Titik-titik sigma dalam bentuk vektor sigma X_i , dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut [13].

$$\begin{aligned} X_0 &= \hat{x} \\ X_i &= \hat{x} + \left(\sqrt{(L + \lambda)P_x} \right)_i, \quad i = 1, \dots, L \\ X_i &= \hat{x} - \left(\sqrt{(L + \lambda)P_x} \right)_{i-L}, \quad i = (L + 1), \dots, 2L \end{aligned} \quad (2.20)$$

dengan,

$$\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - L$$

Misal diberikan variable keadaan :

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_L]^T \quad (2.21)$$

Titik sigma pada persamaan (2.20) dapat dinyatakan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_L \ X_{L+1} \ X_{L+2} \ \dots \ X_{2L}]^T \quad (2.22)$$

Karena $y_k = f(x_k)$, maka penyebaran vektor sigma y_k adalah :

$$y_i = f(X_i), \quad i = 0, \dots, 2L$$

Titik sigma untuk y_i adalah :

$$y_i = f(X_i) = \begin{bmatrix} f(X_0), \\ f(X_1), \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f(X_L), \\ f(X_{L+1}), \\ f(X_{L+2}), \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f(X_{2L}), \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Pembobotan *mean* dan kovarian sebagai berikut :

$$W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{L + \lambda}$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{L + \lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L + \lambda)}, \quad i = 1, \dots, 2L \quad (2.24)$$

Dengan menggunakan titik sigma pada persamaan (2.20), pembobotan *mean* dan kovarian pada persamaan (2.24) diperoleh *mean* sebagai berikut :

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^{2L} [W_i^{(m)} f(X_i)] \quad (2.25)$$

Atau

$$\hat{y} = \left(\frac{\lambda}{L + \lambda} \right) f(X_0) = \frac{1}{2(L + \lambda)} \sum_{i=1}^{2L} [f(X_i)] \quad (2.26)$$

Sedangkan untuk menghitung kovarian dari y digunakan persamaan berikut ini :

$$P_y = \sum_{i=0}^{2L} [W_i^{(c)} (f(X_i) - \hat{y})(f(X_i) - \hat{y})^T] \quad (2.27)$$

Atau

$$P_y = \left(\frac{\lambda}{L + \lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta \right) (f(X_i) - \hat{y})(f(X_i) - \hat{y})^T \quad (2.28)$$

$$+ \frac{1}{2(L + \lambda)} \sum_{i=1}^{2L} [W_i^{(c)} (f(X_i) - \hat{y})(f(X_i) - \hat{y})^T]$$

Estimasi dan kovarian *error* pada persamaan *Unscented Kalman Filter* diperoleh dengan menggunakan Transformasi *Unscented*.

2.8.2 Algoritma *Unscented Kalman Filter*

Metode *Unscented Kalman Filter* adalah metode estimasi yang dimodifikasi dari algoritma *Kalman Filter* yang digunakan untuk memperkirakan model sistem nonlinear dengan menggunakan Transformasi *Unscented*. Bentuk umum dari sistem dinamik non linear di *Unscented Kalman Filter* adalah sebagai berikut :

Model sistem :

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (2.29)$$

Model Pengukuran :

$$z_k = H(x_k, k) + v_k \quad (2.30)$$

dimana x_{k+1} merupakan variable keadaan pada $k + 1$, x_k mewakili variable keadaan pada saat k , z_k merupakan variable pengukuran, u_k didefinisikan sebagai input proses, w_k merupakan *noise* pada sistem, dan v_k merupakan *noise* pada pengukuran. Algoritma *Unscented Kalman Filter* disajikan pada **Tabel 2.2** [12] :

Tabel 2.2 Algoritma *Unscented Kalman Filter* (UKF)

Model Sistem	$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k$
Model Pengukuran	$z_k = H(x_k, k) + v_k$
Inisialisasi pada $k = 0$	$\hat{x}_0 = E[x_0]$ $P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]$ $\hat{x}_0^a = E[x^a] = [\hat{x}_0^T \ 0 \ 0]^T$ $P_0^a = E[(x_0^a - \hat{x}_0^a)(x_0^a - \hat{x}_0^a)^T]$ $= \begin{bmatrix} P_x & 0 & 0 \\ 0 & P_w & 0 \\ 0 & 0 & P_v \end{bmatrix}$
Untuk $k \in \{1, \dots, \infty\}$	<p>Perhitungan Titik Sigma</p> $X_{k-1}^a = [\hat{x}_{k-1}^a \ \hat{x}_{k-1}^a + \gamma\sqrt{P_{k-1}} \ \hat{x}_{k-1}^a - \gamma\sqrt{P_{k-1}}]$ <p>Dimana,</p> $\gamma = \sqrt{L + \lambda}; \lambda = \alpha^2(n + k) - L$
Tahap Prediksi	<p>Perhitungan Titik Sigma :</p> $X_{k k-1}^x = f[X_{k-1}^x, X_{k-1}^w]$ <p>Estimasi :</p> $\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} X_{i,k k-1}^x$ <p>Kovarian Error :</p> $P_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k k-1}^x - \hat{x}_k^-] [X_{i,k k-1}^x - \hat{x}_k^-]^T$ $z_{k k-1} = H[X_{k k-1}^x, X_{k-1}^v]$ $\hat{z}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} z_{i,k k-1}$

<p>Tahap Koreksi</p>	$P_{\bar{z}_k \bar{z}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \left[z_{i,k k-1} - \hat{z}_k^- \right] \left[z_{i,k k-1} - \hat{z}_k^- \right]^T$ $P_{x_k z_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \left[X_{i,k k-1} - \hat{x}_k^- \right] \left[z_{i,k k-1} - \hat{z}_k^- \right]^T$ <p>Kalman Gain :</p> $K_k = P_{x_k, z_k} P_{\bar{z}_k \bar{z}_k}^{-1}$ <p>Estimasi :</p> $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{z}_k^-)$ <p>Kovarian Error :</p> $P_{x_k} = P_{x_k}^- - K_k P_{\bar{z}_k} K_k^T$
----------------------	--

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisi mengenai tahapan-tahapan penelitian yang digunakan dalam mengestimasi konsentrasi polutan pada pencemaran udara di Kota Surabaya dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter*. Adapun metode penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut :

3.1 Studi Literatur

Pada tahap studi literatur, akan dilakukan studi referensi mengenai model pencemaran udara berdasarkan model Difusi Adveksi 2D, algoritma *Kalman Filter*, algoritma *Unscented Kalman Filter* serta referensi penelitian terdahulu mengenai estimasi konsentrasi polutan. Referensi yang digunakan adalah buku, skripsi, tesis, jurnal penelitian sebelumnya, dan dari website di internet yang berkaitan dengan topik pada Tugas Akhir ini.

3.2 Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data ini, penelitian akan menggunakan data tahun 2018 yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya dengan menggunakan alat pengukur kualitas udara bernama *Air Polluting Monitoring System*. Data diambil setiap 30 menit dalam 1 tahun. Polutan yang diamati adalah CO dan NO_2 . Dengan menggunakan 3 alat pemantau kualitas udara yaitu SUF 1 yang berlokasi di Kebonsari, SUF 6 berlokasi di Wonorejo, SUF 7 berlokasi Ketabang Kali.

3.3 Identifikasi Model Pencemaran Udara dan *Unscented Kalman Filter* (UKF)

Pada tahap ini akan diidentifikasi model dari pencemaran udara yaitu model Difusi Adveksi 2D yang merupakan model dinamik inier yang akan akan dibentuk model *state space* yang

selanjutnya dilakukan pendiskritan menggunakan metode beda hingga. Setelah itu akan dilakukan estimasi sistem dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* diantaranya pelinieran yang digunakan sebagai matriks masukan dalam sistem. Setelah itu akan dilakukan pengolahan ke tahap prediksi, koreksi, dan simulasi.

3.4 Implementasi Metode *Unscented Kalman Filter*

Pada tahap implementasi metode *Unscented Kalman Filter* akan berisi tahapan-tahapan yang dilakukan untuk mengestimasi konsentrasi karbon monoksida dan nitrogen dioksida dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter*. Metode *Unscented Kalman Filter*. Tahapan-tahapan metode *Unscented Kalman Filter* yaitu sebagai berikut :

a. Menentukan Model Sistem dan Model Pengukuran

Model sistem dan model pengukuran metode *Unscented Kalman Filter* sebagai berikut :

Model Sistem :

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k$$

Model Pengukuran :

$$z_k = H(x_k, k) + v_k$$

b. Diskritisasi

Karena menggunakan Metode Kalman Filter maka yang akan digunakan yaitu algoritma *Unscented Kalman Filter* waktu diskrit (*Discrete-time Unscented Kalman Filter*). Oleh karena itu, model pencemaran udara didiskritisasi dengan menggunakan metode beda hingga maju karena diprediksi satu langkah ke depan digunakan untuk pendiskritan terhadap waktu dan metode beda hingga pusat karena digunakan untuk pendiskritan terhadap posisi x dan y .

c. Inisialisasi

Pada tahap ini, akan dilakukan perhitungan titik sigma awal. Untuk menghitung titik sigma diperlukan nilai awal pada variabel keadaan yaitu *mean* dan kovarian pada tahap inisialisasi.

d. Menghitung Titik Sigma

Untuk menghitung titik sigma diperlukan *mean* dan kovarian pada tahap inisialisasi menggunakan Transformasi *Unscented*. *Mean* dan kovarian yang didapat digunakan untuk menentukan penyebaran $2L + 1$ titik-titik sigma di sekitar \hat{x} .

e. Tahap Prediksi

Pada tahap prediksi (*time update*) akan dilakukan perhitungan nilai estimasi tahap prediksi pada sistem, kovarian *error* pada tahap prediksi pada sistem. Selanjutnya dilakukan perhitungan titik sigma pada pengukuran. Lalu akan dilakukan *update* titik sigma pengukuran, Maka akan didapatkan titik sigma baru pengukuran. Setelah itu, akan dihitung nilai estimasi tahap prediksi pada pengukuran dan didapat nilai estimasi pada tahap prediksi dan kovarian pada tahap prediksi.

f. Tahap Koreksi

Pada tahap koreksi (*measurement update*) akan terdapat perhitungan kovarian *error* pada pengukuran dan kovarian *cross*. Tahap selanjutnya menghitung Kalman Gain, kovarian *error* pada model pengukuran kemudian diperoleh hasil estimasi. Pada tahap koreksi juga dilakukan kembali ke langkah prediksi secara rekursif atau berulang dengan

melakukan iterasi sebanyak k . Pada tahap ini, perhitungan dikatakan bagus jika nilai kovarian *error*nya semakin kecil dan juga perhitungan dikatakan bagus jika nilai *error*nya semakin kecil pula.

3.5 Simulasi, Analisis Hasil, dan Pembahasan

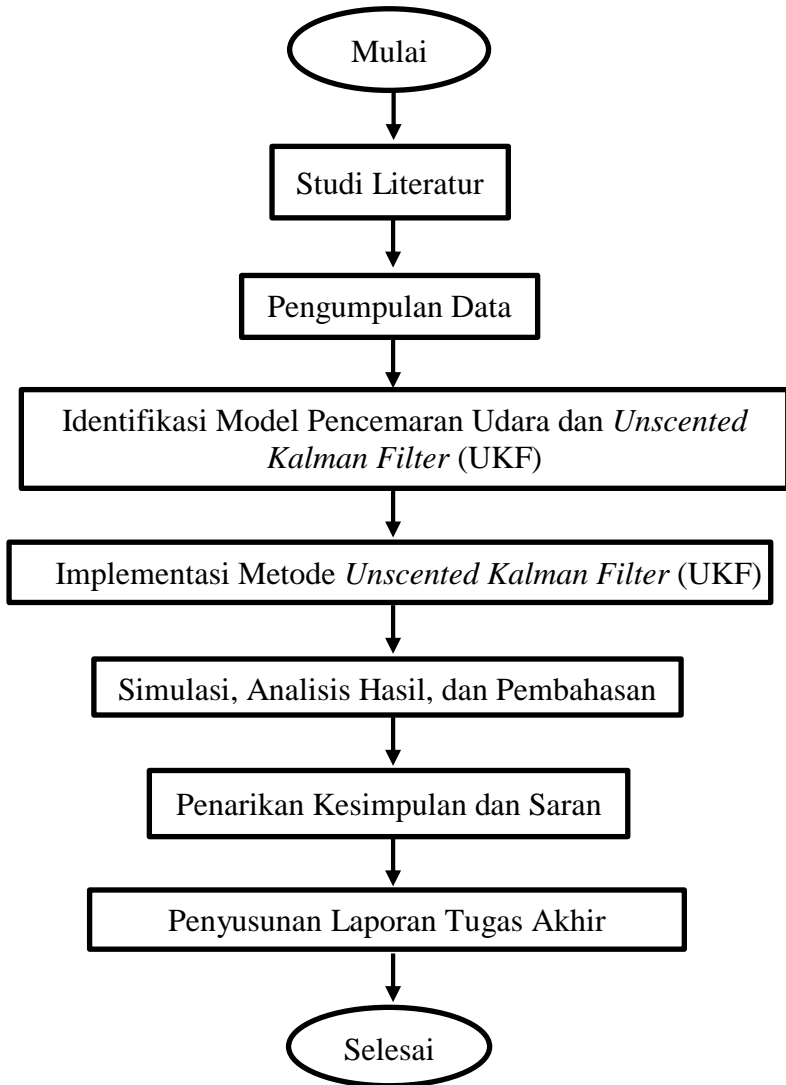
Pada tahap simulasi, analisis hasil dan pembahasan akan dilakukan penerapan model pencemaran udara dengan algoritma *Unscented Kalman Filter*. Selanjutnya akan dilakukan simulasi dengan menggunakan software MATLAB untuk mengetahui hasil estimasi dan dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang diberikan pada tahap sebelumnya. Kemudian, cek nilai *RMSE* nya, jika nilainya kecil, maka metode ini sudah benar dan sesuai dengan modelnya.

3.6 Penarikan Kesimpulan dan Saran

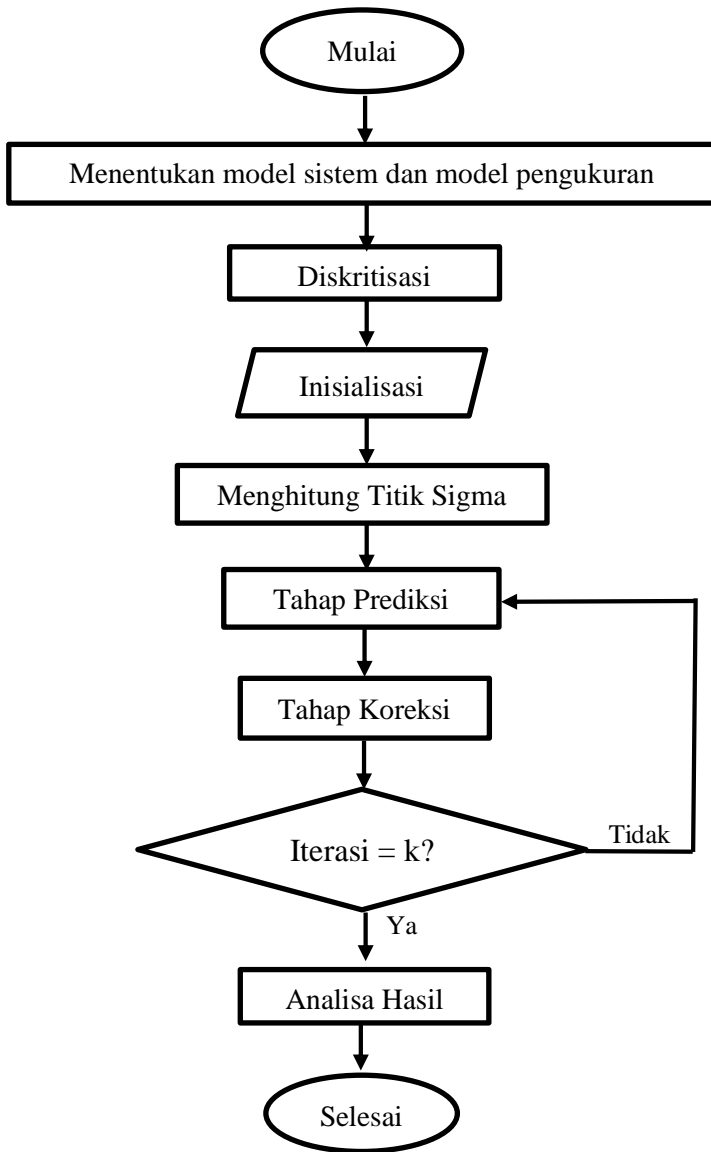
Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan pada tahap sebelumnya. Setelah penarikan kesimpulan pada tahap ini juga diberikan saran-saran untuk penelitian mendatang.

3.7 Penyusunan Laporan Tugas Akhir

Pada tahap ini dilakukan penyusunan laporan tugas akhir berdasarkan analisis dari penelitian yang sudah dilakukan



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Metode *Unscented Kalman Filter*

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai estimasi konsentrasi CO dan NO₂ pada pencemaran udara serta mengestimasi titik-titik atau lokasi yang belum ada alat pemantau polusi udara. Analisa dan pembahasan pada bab ini meliputi pembentukan model ruang keadaan (*state space*). Selanjutnya akan dilakukan proses estimasi menggunakan metode *Unscented Kalman Filter* dan dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* MATLAB untuk memperoleh keakurasian dari metode *Unscented Kalman Filter* dan menganalisis hasilnya.

4.1 Pendiskritan Model Difusi Adveksi 2 Dimensi

Pendiskritisasi pada model merupakan proses perubahan sistem dinamik waktu kontinu diubah ke sistem pada waktu diskrit dengan menggunakan metode beda hingga. Kegunaan diskritisasi adalah untuk mereduksi dan menyederhanakan sistem sehingga didapat sistem diskrit yang lebih mudah digunakan [14]. Model pencemaran udara Difusi Adveksi 2 Dimensi [8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (U_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (U_y C) \right] \quad (4.1)$$

Dari persamaan Difusi Adveksi (4.1) akan dilakukan pendiskritan pada model dengan menggunakan metode beda hingga. Pendiskritan terhadap waktu akan didiskritkan menggunakan beda maju, sedangkan pendiskritan terhadap posisi x dan y didiskritkan menggunakan beda pusat. Dalam hal ini, D_x dan D_y nilainya konstan sedangkan U_x dan U_y juga bernilai konstan. Persamaan Difusi Adveksi (4.1) didiskritkan sebagai berikut :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (U_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (U_y C) \right]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (U_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (U_y C) \right]$$

Selanjutnya dilakukan pendiskritan terhadap waktu dengan menggunakan beda maju dan pendiskritan terhadap posisi x dan y menggunakan beda pusat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^{k+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} = & \left[D_x \frac{C_{i+1,j}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i-1,j}^k}{(\Delta x)^2} \right. \\ & \left. + D_y \frac{C_{i,j+1}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} \right] - \\ & \left[U_x \frac{C_{i+1,j}^k - C_{i-1,j}^k}{2\Delta x} + U_y \frac{C_{i,j+1}^k - C_{i,j-1}^k}{2\Delta y} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^{k+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} = & \frac{D_x}{(\Delta x)^2} (C_{i+1,j}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i-1,j}^k) + \\ & \frac{D_y}{(\Delta y)^2} (C_{i,j+1}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i,j-1}^k) - \\ & \frac{U_x}{2\Delta x} (C_{i+1,j}^k - C_{i-1,j}^k) - \\ & \frac{U_y}{2\Delta y} (C_{i,j+1}^k - C_{i,j-1}^k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^{k+1}}{\Delta t} = & C_{i+1,j}^k \left(\frac{D_x}{(\Delta x)^2} - \frac{U_x}{2\Delta x} \right) + \\ & C_{i,j}^k \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{2D_x}{(\Delta x)^2} - \frac{2D_y}{(\Delta y)^2} \right) + \\ & C_{i-1,j}^k \left(\frac{D_x}{(\Delta x)^2} + \frac{U_x}{2\Delta x} \right) + \\ & C_{i,j+1}^k \left(\frac{D_y}{(\Delta y)^2} - \frac{U_y}{2\Delta y} \right) + \\ & C_{i,j-1}^k \left(\frac{D_y}{(\Delta y)^2} + \frac{U_y}{2\Delta y} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{i,j}^{k+1} = & C_{i+1,j}^k \left(\frac{D_x}{(\Delta x)^2} - \frac{U_x}{2\Delta x} \right) \Delta t + \\
& C_{i,j}^k \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{2D_x}{(\Delta x)^2} - \frac{2D_y}{(\Delta y)^2} \right) \Delta t + \\
& C_{i-1,j}^k \left(\frac{D_x}{(\Delta x)^2} + \frac{U_x}{2\Delta x} \right) \Delta t + \\
& C_{i,j+1}^k \left(\frac{D_y}{(\Delta y)^2} - \frac{U_y}{2\Delta y} \right) \Delta t + \\
& C_{i,j-1}^k \left(\frac{D_y}{(\Delta y)^2} + \frac{U_y}{2\Delta y} \right) \Delta t
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Persamaan (4.2) akan dimisalkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
a &= \left(\frac{D_x}{(\Delta x)^2} - \frac{U_x}{2\Delta x} \right) \Delta t \\
b &= \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{2D_x}{(\Delta x)^2} - \frac{2D_y}{(\Delta y)^2} \right) \Delta t \\
c &= \left(\frac{D_x}{(\Delta x)^2} + \frac{U_x}{2\Delta x} \right) \Delta t \\
d &= \left(\frac{D_y}{(\Delta y)^2} - \frac{U_y}{2\Delta y} \right) \Delta t \\
e &= \left(\frac{D_y}{(\Delta y)^2} + \frac{U_y}{2\Delta y} \right) \Delta t
\end{aligned}$$

Sehingga dari hasil tersebut diatas dapat disederhanakan menjadi:

$$C_{i,j}^{k+1} = aC_{i+1,j}^k + bC_{i,j}^k + cC_{i-1,j}^k + dC_{i,j+1}^k + eC_{i,j-1}^k \tag{4.3}$$

dengan syarat batas :

$$\begin{aligned}
C_{i,0}^k &= 0 \\
C_{0,j}^k &= 0
\end{aligned}$$

Dengan nilai-nilai a, b, c, d, e berupa konstanta yang terbentuk karena pendiskritan, $i, j = 1, 2, 3, \dots, 10$, $C_{i,j}^k$ adalah

konsentrasi polutan CO dan NO₂ pada posisi ke i, j dalam waktu ke k . Persamaan (4.3) dapat diimplementasikan ke dalam bentuk persamaan ruang keadaan (*state space*) matriks $x_{k+1} = Ax_k$ sebagai berikut :

$$x_k = [C_{1,1}^k \quad C_{1,2}^k \quad \dots \quad C_{i,j}^k \quad C_{i+1,j}^k \quad \dots \quad C_{10,10}^k]^T$$

Matriks x_k berdimensi 100×1 yang nilainya diperoleh dari data yang tersedia. A merupakan matriks konstan berukuran 100×100 yang diperoleh dari proses pendiskritan. Bentuk dari matriks A sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} b & d & 0 & \dots & a & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ e & b & d & 0 & \dots & a & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e & b & d & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & e & b & 0 & \dots & \dots & a & \vdots \\ c & \dots & \dots & \dots & 0 & b & d & \dots & \dots & a \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & c & \dots & \dots & 0 & b & d & \vdots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & c & \dots & \dots & e & b & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_k \quad (4.4)$$

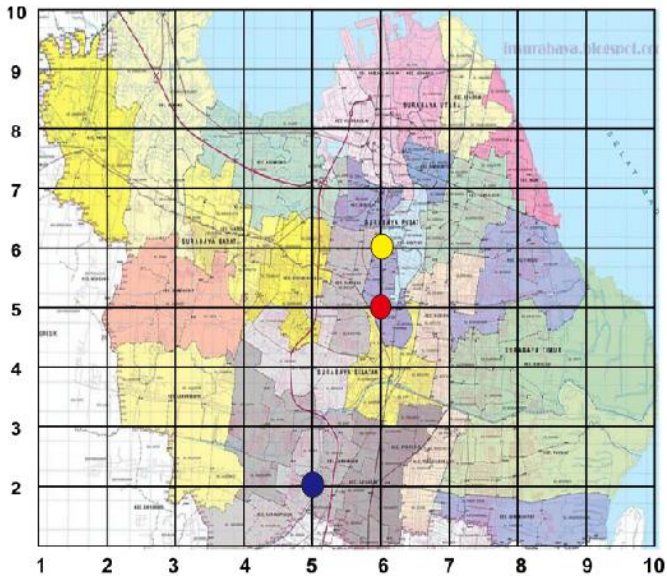
4.2 Pembentukan Matriks Koefisien Pengukuran

Untuk mengestimasi konsentrasi polutan CO dan NO₂ kedalam *Unscented Kalman Filter*, maka langkah yang akan dilakukan adalah mendefinisikan persamaan pengukuran $z_k = HC_k$ untuk menghubungkan antara data-data pengukuran dengan estimasi \hat{c}_k .

Dengan $C_k = [C_{1,1} \quad \dots \quad C_{2,1} \quad \dots \quad C_{10,10}]^T$. H adalah matriks koefisien pengukuran. Dari lokasi titik pengukuran dapat diperoleh nilai koefisien pada matriks koefisien pengukuran.

Berikut ini akan ditampilkan denah Kota Surabaya yang dibagi menjadi 100 lokasi yaitu 10 mendatar dan 10 vertikal. Selain itu terdapat titik-titik data polutan yang tersedia berada di

titik koordinat (5,2); (6,5); (6,6). Selain itu, titik-titik tersebut juga menunjukkan lokasi penempatan alat ukur kualitas udara di Kota Surabaya. Berikut ini adalah peta pendiskritan Kota Surabaya :



Gambar 4.1 Lokasi penempatan alat ukur pencemaran udara di Kota Surabaya

Lokasi pada titik koordinat (5,2) menunjukkan lokasi daerah Kebonsari, titik koordinat (6,5) menunjukkan lokasi daerah Wonorejo, dan pada titik koordinat (6,6) menunjukkan lokasi daerah Ketabang Kali.

Berdasarkan pada model sistem pengukuran $z_k = Hx_k$ dengan matriks $z_{3 \times 1}$ sebagai vektor pengukuran dan matriks $x_{k_{100 \times 1}}$ sebagai variable keadaan, maka dapat dibentuk matriks $H_{3 \times 100}$ sebagai berikut :

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Matriks H merupakan matriks yang menghubungkan antara data hasil pengukuran dengan variabel yang diestimasi. Untuk titik koordinat (5,2) dapat didefinisikan menjadi titik $H(1,42) = 1$, dan titik koordinat (6,5) dapat didefinisikan menjadi titik $H(2,55) = 1$, serta titik koordinat (6,6) dapat didefinisikan menjadi titik $H(3,56) = 1$ dan 0 untuk semua titik yang lain dalam matriks H.

4.3 Tes Keteramatan (*Observability*)

Untuk mengecek apakah alat ukur pencemaran udara sudah berada pada titik lokasi yang tepat, maka hasil dari pengamatan ketiga alat tersebut dapat mewakili dari besarnya konsentrasi polutan di kota Surabaya, maka perlu dilakukan tes keteramatan. Pengertian keteramatan adalah keadaan dimana jika yang diketahui adalah beberapa variabel keadaan maka dapat mengetahui semua variabel keadaan dalam sistem berdasarkan data-data tersebut. Untuk melakukan tes keteramatan (*Observability*) perlu diketahui bahwa :

Misalkan diberikan sistem dinamik linear kontinu :

$$\dot{X} = AX + BU$$

Dan model pengukuran atau output :

$$Z = HX$$

Sistem akan teramati jika matriks observability adalah sebagai berikut :

$$W = \begin{pmatrix} H \\ H A \\ H A^2 \\ \vdots \\ H A^{n-1} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

dengan $n = 100$

Tes Keteramatan atau Observability ini dilakukan dengan menggunakan pemograman MATLAB. Dari pemograman tersebut dapat diketahui bahwa matiks W mempunyai range (rank) = $6 < n$. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang diamati tidak *observable* atau tidak teramati

4.4 Sistem Diskrit Stokastik

Model dengan waktu diskrit yang dinyatakan pada Persamaan (4.4) merupakan model yang mengabaikan adanya gangguan atau *noise*. *Noise* tersebut dapat terjadi pada model sistem seperti kesalahan dalam memodelkan dan juga *noise* dapat terjadi pada model pengukuran. Walaupun nilai *noise* sangat kecil namun perlu diperhitungkan adanya suatu *noise*. Sehingga diperoleh persamaan sistem dinamik diskrit stokastik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} b & d & 0 & \dots & a & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ e & b & d & 0 & \dots & a & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e & b & d & 0 & \dots & \vdots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & e & b & 0 & \dots & \dots & a \\ c & \dots & \dots & \dots & 0 & b & d & \dots & \dots & a \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & c & \dots & \dots & 0 & b & d & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & c & \dots & \dots & e & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} W_{1,1} \\ W_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ W_{i,j} \\ W_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ W_{10,10} \end{bmatrix}_k \quad (4.7)$$

4.5 Implementasi Algoritma *Unscented Kalman Filter* pada Estimasi

Setelah mengetahui cara pembentukan model estimasi pencemaran udara yaitu Difusi Adveksi 2D dan menentukan data pengukurannya, kemudian dilakukan simulasi menggunakan MATLAB untuk dapat menganalisa hasilnya.

Model sistem yang digunakan pada metode *Unscented Kalman Filter* sama seperti pada persamaan (2.27) dan model pengukuran pada persamaan (2.28) adalah sebagai berikut :

Model Sistem :

$$x_{k+1} = f(x_k) + w_k$$

Dengan

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_{k+1} ; w_k = \begin{bmatrix} W_{1,1} \\ W_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ W_{i,j} \\ W_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ W_{10,10} \end{bmatrix}_k ;$$

$$f(x_{k+1}) = \begin{bmatrix} f_{1,1} \\ f_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ f_{i,j} \\ f_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ f_{10,10} \end{bmatrix}_{k+1}$$

Dimana :

$$f(x_k) = Ax_k$$

$$\begin{bmatrix} f_{1,1} \\ f_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ f_{i,j} \\ f_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ f_{10,10} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} b & d & 0 & \dots & a & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ e & b & d & 0 & \dots & a & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e & b & d & 0 & \dots & \vdots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & e & b & 0 & \dots & \dots & a & \vdots \\ c & \dots & \dots & \dots & 0 & b & d & \dots & \dots & a \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & c & \dots & \dots & \dots & 0 & b & d & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & c & \dots & \dots & \dots & e & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_k$$

Dengan keterangan bahwa w_k menyatakan *noise* sistem yang berdistribusi normal dengan *mean* nol dan varians $Q_k, w_k \sim N(0, Q_k)$.

Model Pengukuran :

$$z_k = H(x_k, k) + v_k$$

$$z_k = Hx_k + v_k$$

$$z_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} v_{1k} \\ v_{2k} \\ v_{3k} \end{bmatrix}$$

Matriks pengukuran H ditentukan dari variabel keadaan yang dijadikan variabel pengukuran yaitu $x_{42} = C_{5,2}$, $x_{55} = C_{6,5}$, $x_{56} = C_{6,6}$ yang menotasikan SUF 1 yang berlokasi di Kebonsari, SUF 6 berlokasi di Wonorejo, SUF 7 berlokasi Ketabang Kali. Untuk ukuran matriks dari *noise* pengukuran berukuran sesuai dengan jumlah vektor data *real* SUF yakni 3×3 .

Dengan keterangan v_k merupakan *noise* pengukuran yang berdistribusi normal dengan *mean* nol dan varians R_k , $v_k \sim N(0, R_k)$.

4.5.1 Tahap Inisialisasi

Pada tahap ini, akan dilakukan perhitungan titik sigma awal. Untuk menghitung titik sigma diperlukan nilai awal pada variabel keadaan yang didefinisikan sebagai berikut:

$$x_0 = \begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_{k=0}$$

$$\hat{x}_0^a = E[x^a] = E \begin{bmatrix} C_{1,1} \\ C_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{i,j} \\ C_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ C_{10,10} \end{bmatrix}_{k=0} = \begin{bmatrix} \hat{C}_{1,1} \\ \hat{C}_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \hat{C}_{i,j} \\ \hat{C}_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \hat{C}_{10,10} \end{bmatrix}_{k=0}$$

Dimensi dari state estimasi adalah sebanyak jumlah variabel dan parameter yang diestimasi, pada penelitian kali ini dimensi dari state estimasinya disimbolkan L yaitu 100. Sedangkan matriks kovarian berukuran 100×100 sebagai berikut :

$$P^a = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} & P_{1,4} & P_{1,5} & \cdots & \cdots & \cdots & P_{1,99} & P_{1,100} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{2,100} \\ P_{3,1} & \cdots & P_{3,3} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{3,100} \\ P_{4,1} & \cdots & \cdots & P_{4,4} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{4,100} \\ P_{5,1} & \cdots & \cdots & \cdots & P_{5,5} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{5,100} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ P_{99,1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{99,99} & P_{99,100} \\ P_{100,1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{100,100} \end{bmatrix}_k$$

$$P_0^a = \begin{bmatrix} P_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & P_{2,2} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & P_{3,3} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & P_{4,4} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & P_{5,5} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{99,99} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & P_{100,100} \end{bmatrix}_{k=0}$$

Pada tahap inisialisasi ini, nilai inisialisasi diberikan dengan melakukan dugaan nilai yang memungkinkan, agar didapatkan hasil estimasi yang paling baik. Untuk nilai $k = 1, 2, 3, \dots$

Berdasarkan Transformasi *Unscented* diperlukan $2L + 1$ titik sigma, dimana L adalah dimensi dari *state* tambahan. Dari model Difusi-Adveksi 2D yang diberikan, diketahui bahwa nilai $L = 100$ dilihat dari jumlah variabel pada x_0 . Sehingga didapatkan 201 titik sigma. Perhitungan titik sigma sebagai berikut :

$$X_{k-1}^a = [\hat{x}_0 \ X_i \ X_i \] \quad (4.8)$$

Dengan,

$$x_0 = \begin{bmatrix} \hat{C}_{1,1} \\ \hat{C}_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \hat{C}_{i,j} \\ \hat{C}_{i+1,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \hat{C}_{10,10} \end{bmatrix}_{k-1}^a$$

Berikut ini titik-titik sigma dalam bentuk vektor sigma X_i :

$$X_i = \hat{x} + \left(\sqrt{(L + \lambda)P_x} \right)_i, \quad i = 1, \dots, L$$

Untuk $i = 1, 2, 3, \dots, L = 100$

$$X_i = \begin{bmatrix} \hat{C}_{1,1_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \cdots & \hat{C}_{1,1_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \hat{C}_{1,2_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \cdots & \hat{C}_{1,2_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{C}_{i,j_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \cdots & \hat{C}_{i,j_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \hat{C}_{i+1,j_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \cdots & \hat{C}_{i+1,j_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{C}_{10,10_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \cdots & \hat{C}_{10,10_{k-1}}^a + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \end{bmatrix}$$

$$X_i = \hat{x} - \left(\sqrt{(L + \lambda)P_x} \right)_{i-L}, \quad i = (L + 1), \dots, 2L$$

Untuk $i = L + 1, L + 2, L + 3, \dots, 2L = 200$

$$X_i = \begin{bmatrix} \hat{C}_{1,1,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \dots & \hat{C}_{1,1,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \hat{C}_{1,2,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \dots & \hat{C}_{1,2,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{C}_{i,j,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \dots & \hat{C}_{i,j,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \hat{C}_{i+1,j,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \dots & \hat{C}_{i+1,j,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{C}_{10,10,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_1 & \dots & \hat{C}_{10,10,k-1}^a - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{100} \end{bmatrix}$$

Didefinisikan sebagai berikut :

$$\gamma = \sqrt{L + \lambda}$$

$$\lambda = \alpha^2(L + \kappa) - L$$

selanjutnya akan disubstitusikan persamaan λ pada persamaan γ maka akan di peroleh :

$$\gamma = \sqrt{L + \alpha^2(L + \kappa) - L}$$

$$= \alpha\sqrt{L + \kappa}$$

dengan α dan κ adalah *tuning parameter*. α dinyatakan dengan suatu nilai positif yang kecil ($0 \leq \alpha \leq 1$) atau dalam penelitian-penelitian yang terkait digunakan $\alpha = 0,001$ yang merupakan kontrol dari distribusi *sigma points*. Setelah diperoleh matriks *sigma points* selanjutnya dilakukan transformasi titik-titik sigma dari sistem dan *noise* sistem ke dalam fungsi di tahap prediksi.

4.5.2 Tahap Prediksi

Titik sigma yang telah diperoleh dari tahap inialisasi, selanjutnya akan disubstitusikan ke fungsi tahap prediksi. Pada tahap prediksi ini dilakukan perhitungan sistem dan pengukuran. Tahap pertama akan dilakukan perhitungan titik sigma baru tahap prediksi pada sistem dengan memetakan titik sigma yang diperoleh sebelumnya pada fungsi model sistem sebagai berikut :

$$X_{k|k-1}^x = f[X_{k-1}^x, X_{k-1}^w] \quad (4.9)$$

Selanjutnya setelah diperoleh titik sigma baru, maka nilai estimasi tahap prediksi pada sistem dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} X_{i,k|k-1}^x \quad (4.10)$$

Dan didapat juga kovarian *error* pada tahap prediksi pada sistem dengan persamaan berikut:

$$P_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k|k-1}^x - \hat{x}_k^-] [X_{i,k|k-1}^x - \hat{x}_k^-]^T \quad (4.11)$$

Setelah diperoleh nilai estimasi dan kovarian *error* pada sistem dilakukan perhitungan titik sigma pada pengukuran menggunakan persamaan berikut ini :

$$X_{k-1}^a = [\hat{x}_{k-1}^a \quad \hat{x}_{k-1}^a + \gamma\sqrt{P_{k-1}} \quad \hat{x}_{k-1} - \gamma\sqrt{P_{k-1}}] \quad (4.12)$$

Lalu pada persamaan (4.13) akan dilakukan *update* titik sigma pengukuran sebagai berikut :

$$Z_{k|k-1} = H[X_{k|k-1}^x, X_{k-1}^v] \quad (4.13)$$

Maka akan didapatkan titik sigma baru pengukuran pada persamaan (4.13), selanjutnya akan dihitung nilai estimasi tahap prediksi pada pengukuran sebagai berikut :

$$\hat{z}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} z_{i,k|k-1} \quad (4.14)$$

Sehingga pada persamaan (4.10) dan (4.14) akan didapat nilai estimasi pada tahap prediksi dan kovarian pada persamaan (4.11) pada tahap prediksi. Pada tahap selanjutnya akan masuk pada tahap koreksi

4.5.3 Tahap Koreksi

Pada tahap koreksi ini, akan terdapat perhitungan kovarian *error* pada pengukuran dan kovarian *cross*. Berikut ini persamaan dari kovarian *error* pada pengukuran :

$$P_{\bar{z}_k \bar{z}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [z_{i,k|k-1} - \hat{z}_k^-] [z_{i,k|k-1} - \hat{z}_k^-]^T \quad (4.15)$$

dengan bobot W_i diberikan oleh :

$$W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{L + \lambda} \quad (4.16)$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{L + \lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta \quad (4.17)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L + \lambda)}, \quad i = 1, \dots, 2L \quad (4.18)$$

dengan mengambil nilai $L = 100, \kappa = 0, \beta = 2$, diperoleh nilai bobot-bobot dari persamaan (4.1) – (4.3).

Selanjutnya untuk menghitung kovarian *cross* melalui:

$$P_{x_k z_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-] [z_{i,k|k-1} - \hat{z}_k^-]^T \quad (4.19)$$

Untuk menghitung Kalman Gain diperoleh melalui persamaan sebagai berikut :

$$K_k = P_{x_k, z_k} P_{z_k}^{-1} \quad (4.20)$$

Setelah menghitung Kalman Gain, nilai estimasi pada tahap koreksi akan didapat dengan menggunakan Kalman Gain sebagai berikut :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - \hat{z}_k^-) \quad (4.21)$$

Sedangkan kovarian *error* dari estimasi pada tahap koreksi adalah:

$$P_{x_k} = P_{x_k}^- - K_k P_{z_k} K_k^T \quad (4.22)$$

Setelah didapat nilai estimasi dan kovarian, maka proses ini akan kembali ke tahap prediksi. Proses ini akan berulang terus-menerus selama waktu k yang ditentukan.

4.6 Analisis Hasil Simulasi *Unscented Kalman Filter*

Pada bab ini akan diterapkan simulasi dengan menggunakan algoritma *Unscented Kalman Filter* untuk model Difusi Adveksi 2D pada pencemaran udara menggunakan bantuan *software* MATLAB. Pada simulasi ini akan dibandingkan nilai estimasi menggunakan algoritma *Unscented Kalman Filter* dengan data polutan yang ada dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya tahun 2018 dan nilai estimasi tanpa memasukan atau menggunakan data pengukuran. Kemudian data tersebut akan disajikan dalam bentuk grafik serta menampilkan nilai RMSE yang dibandingkan. Iterasi dilakukan sesuai dengan jumlah data yang diambil yaitu 100 data pengukuran. Dalam simulasi ini, diberikan nilai awal dari parameter yang digunakan pada Tabel (4.1) sebagai berikut :

Tabel 4.1 Kondisi awal masing-masing parameter

Variabel	Kondisi Awal
α	0.001
β	2
κ	0
D_x	36 km ² /jam
D_y	36 km ² /jam
Δx	2 km
Δy	2 km

Pada simulasi estimasi konsentrasi polutan CO dan NO₂, hasil estimasi yang divalidasi yaitu hasil estimasi konsentrasi polutan karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) pada SUF 1 yang berlokasi di Kebonsari, SUF 6 yang berlokasi di Wonorejo, dan SUF 7 yang berlokasi Ketabang Kali serta 3 lokasi tambahan yang tidak memiliki alat ukur kualitas udara. Dengan membandingkan antara nilai hasil simulasi dan data pengukuran, dapat dilihat pula tingkat keakuratan metode *Unscented Kalman Filter* dalam melakukan proses estimasi. Metode yang digunakan untuk membandingkan antara hasil estimasi dengan hasil pengukuran adalah *Root Mean Square Error* (RMSE).

4.6.1 Simulasi dan Analisa Pembahasan Estimasi Karbon Monoksida (CO) dengan Data Pengukuran

Simulasi pada subbab ini dilakukan menggunakan kondisi awal kecepatan angin dimisalkan konstan, namun karena kecepatan angin bernilai konstan maka akan dilakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin terhadap tingkat akurasi pada hasil estimasi konsentrasi polutan. Besar kecepatan angin yang digunakan untuk simulasi ini menggunakan data rata-rata kecepatan angin dari data Stasiun BMKG Juanda Surabaya pada bulan Januari tahun 2018 dengan arah angin menuju ke arah barat. Selain itu pada simulasi ini juga menggunakan data pengukuran yang berupa data polutan yang ada dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya tahun 2018

Pada tahap ini akan dilakukan 10 simulasi untuk masing-masing kecepatan angin yang berbeda untuk menghitung rata-rata nilai RMSE pada konsentrasi polutan Karbon Monoksida (CO) di SUF1, SUF6, SUF7. Karena kecepatan angin dibuat konstan maka akan dibuat 10 simulasi RMSE per SUF dengan kecepatan angin yang berbeda serta lama waktu komputasi yang dibutuhkan pada simulasi. Dalam Tabel (4.2) dibawah ini akan diberikan kondisi awal konsentrasi polutan CO sesuai dengan data awal konsentrasi CO dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya sebagai berikut :

Tabel 4.2 Kondisi awal Konsentrasi Polutan CO

Lokasi Pengukuran	Konsentrasi CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Kebonsari/SUF 1 (5,2)	1.1875
Wonorejo/SUF 6 (6,5)	1.8669
Ketabang Kali /SUF 7 (6,6)	0.7665

Berikut akan ditunjukkan RMSE *Unscented Kalman Filter* polutan CO pada Tabel (4.3) dibawah ini :

Tabel 4.3 RMSE *Unscented Kalman Filter* Polutan CO

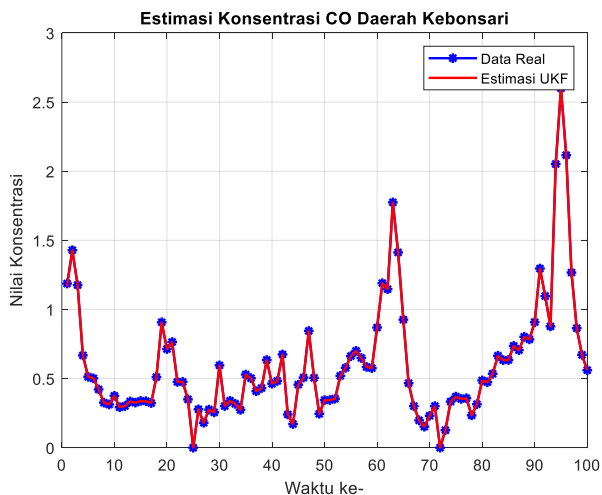
Kecepatan Angin (Km/Jam)	Simulasi	RMSE Karbon Monoksida (CO)			Waktu Komputasi (s)
		SUF 1 (5,2)	SUF 6 (6,5)	SUF 7 (6,6)	
10	1	0.0041	0.0085	0.0052	2.609942
	2	0.0016	0.0060	0.0032	3.060612
	3	0.0037	0.0041	0.0038	3.177204
	4	0.0022	0.0034	0.0035	3.227506
	5	0.0025	0.0027	0.0030	2.559059
	6	0.0011	0.0038	0.0061	2.527887
	7	0.0021	0.0036	0.0028	2.637508
	8	0.0020	0.0021	0.0030	2.790458
	9	0.0012	0.0022	0.0039	2.695935
	10	0.0029	0.0088	0.0054	2.498272
Rata-Rata RMSE		0.0023	0.0045	0.0040	2.778438

15	1	0.0029	0.0063	0.0039	2.961304
	2	0.0022	0.0018	0.0025	3.079356
	3	0.0027	0.0031	0.0039	3.486517
	4	0.0010	0.0026	0.0069	3.082530
	5	0.0009	0.0020	0.0026	5.648417
	6	0.0031	0.0036	0.0052	3.321107
	7	0.0021	0.0010	0.0023	4.830087
	8	0.0017	0.0032	0.0029	3.994526
	9	0.0020	0.0038	0.0041	3.874213
	10	0.0036	0.0024	0.0029	4.256880
Rata-Rata RMSE		0.0022	0.0030	0.0037	3.853494
20	1	0.0018	0.0013	0.0029	3.806131
	2	0.0035	0.0013	0.0028	4.908310
	3	0.0014	0.0024	0.0032	3.701792
	4	0.0017	0.0059	0.0036	7.075177
	5	0.0030	0.0024	0.0027	5.991462
	6	0.0017	0.0031	0.0032	4.398389
	7	0.0017	0.0022	0.0025	3.436725
	8	0.0018	0.0018	0.0030	3.670229
	9	0.0019	0.0020	0.0022	3.455327
	10	0.0024	0.0030	0.0040	3.737484
Rata-Rata RMSE		0.0021	0.0025	0.0030	4.418103

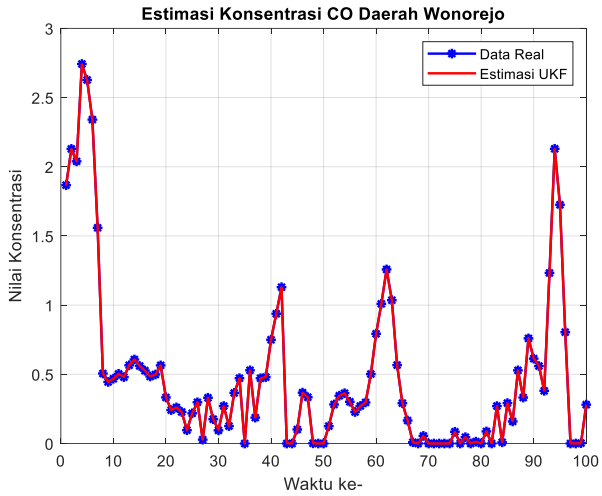
Pada Tabel (4.3) merepresentasikan error dan waktu komputasi estimasi konsentrasi polutan karbon monoksida (CO) dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter* dengan kecepatan angin yang berbeda. Berdasarkan pada table diatas dapat dilihat bahwa nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) mengalami penurunan atau nilainya semakin kecil dengan kecepatan angin yang semakin tinggi. Karena RMSE adalah metode yang digunakan untuk membandingkan antara hasil estimasi dengan hasil pengukuran, sehingga dapat dilihat tingkat keakuratan metode *Unscented Kalman Filter* dalam melakukan proses estimasi. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa semakin besar kecepatan angin yang disimulasikan kedalam sistem maka

akan mempengaruhi tingkat keakurasian nilai estimasi, sehingga nilai estimasi semakin valid dengan data sebenarnya.

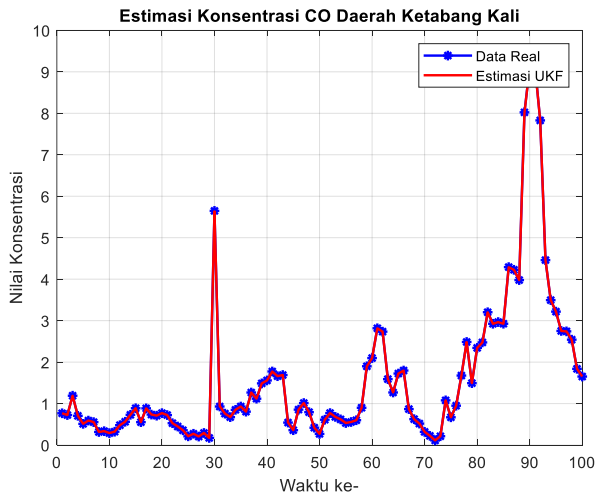
Berikut ini akan ditampilkan grafik perbandingan antara nilai estimasi konsentrasi polutan CO dengan data aktual atau data pengukuran konsentrasi polutan CO yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya dengan menggunakan kecepatan angin 10 km/jam dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.2 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam



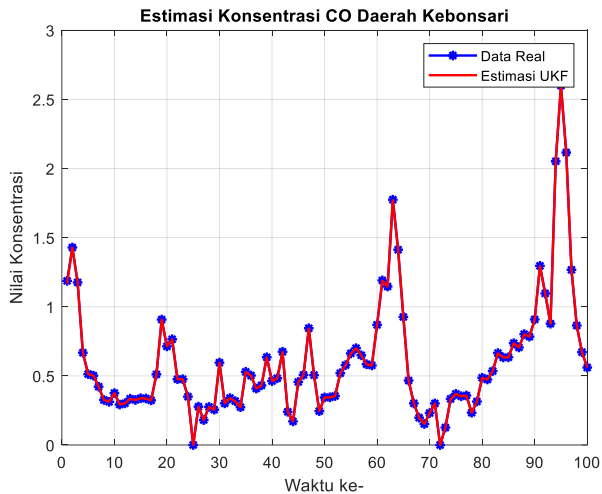
Gambar 4.3 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 6 (Wonorejo) dengan kecepatan angin 10 km/jam



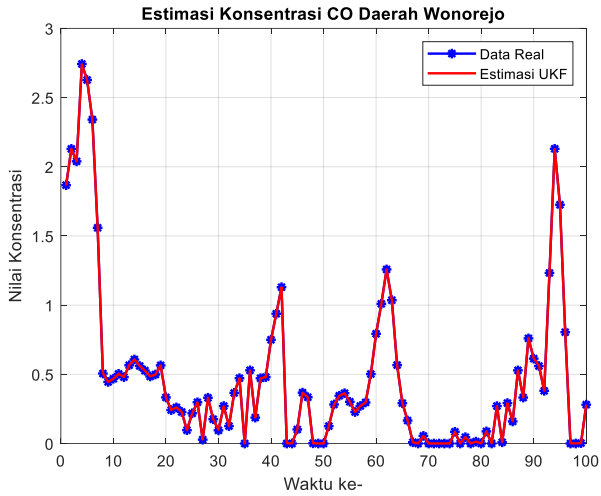
Gambar 4.4 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam

Pada Gambar (4.2), (4.3), dan (4.4) menunjukkan perbandingan nilai estimasi konsentrasi CO dengan data aktual di setiap SUF dengan kecepatan angin 10 km/jam. Hasil estimasi konsentrasi polutan CO dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* berimpit dengan data aktual CO. Hal ini karena hasil estimasi konsentrasi polutan CO dengan *Unscented Kalman Filter* menghasilkan nilai RMSE yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan hasil estimasi CO pada gambar (4.2), (4.3), dan (4.4) telah valid. Nilai RMSE pada SUF 1 sebesar 0.0023, pada SUF 6 sebesar 0.0045, dan pada SUF 7 sebesar 0.0040 dengan waktu komputasi 2.778438 detik.

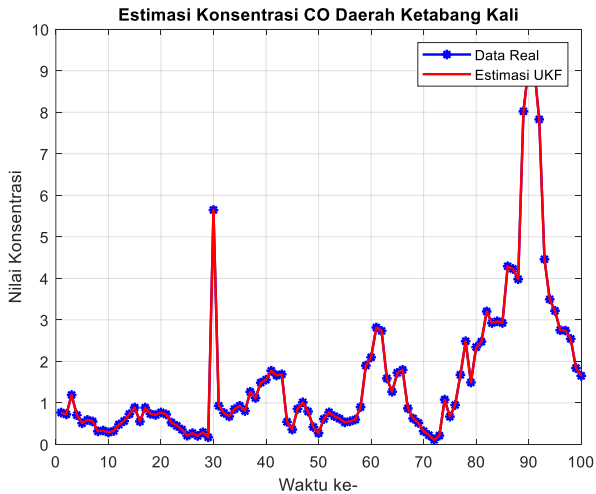
Selanjutnya grafik perbandingan antara nilai estimasi konsentrasi polutan CO dengan data aktual konsentrasi CO yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya dengan menggunakan kecepatan angin 15 km/jam dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.5 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam



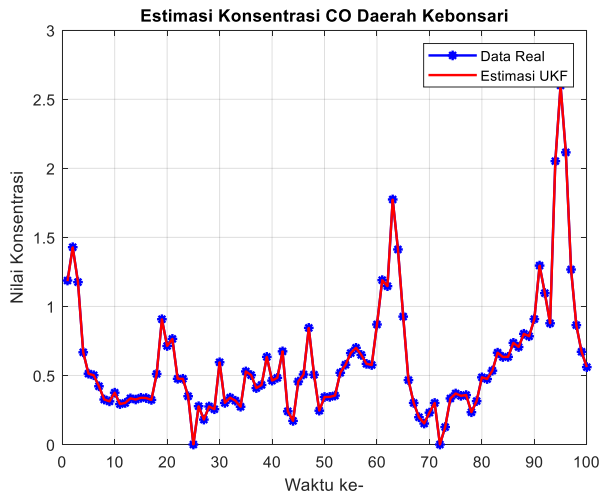
Gambar 4.6 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam



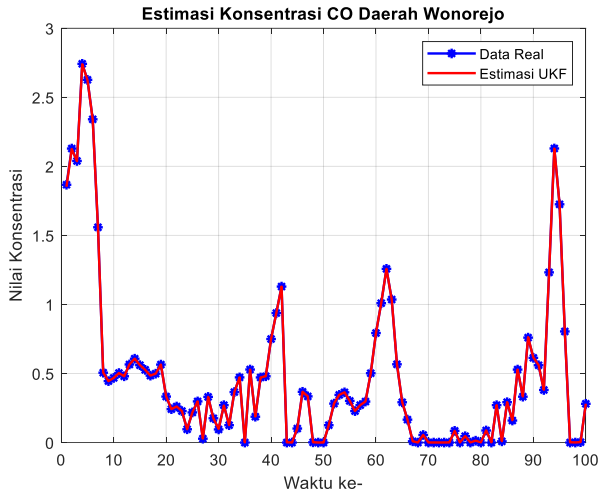
Gambar 4.7 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam

Pada Gambar (4.5), (4.6), dan (4.7) menunjukkan perbandingan nilai estimasi konsentrasi CO dengan data aktual di setiap SUF dengan kecepatan angin 15 km/jam. Hasil estimasi konsentrasi polutan CO dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* berimpit dengan data aktual CO. Hal ini karena hasil estimasi konsentrasi polutan CO dengan *Unscented Kalman Filter* menghasilkan nilai RMSE yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan hasil estimasi CO pada gambar (4.5), (4.6), dan (4.7) telah valid. Nilai RMSE pada SUF 1 sebesar 0.0022, pada SUF 6 sebesar 0.0030, dan pada SUF 7 sebesar 0.0037 dengan waktu komputasi 3.853494 detik.

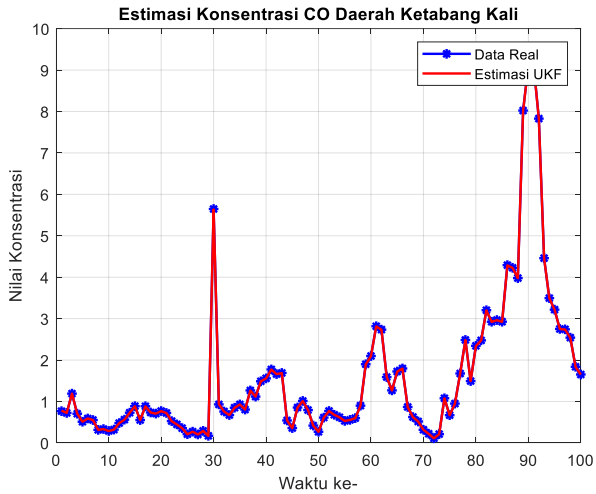
Selanjutnya grafik perbandingan antara nilai estimasi konsentrasi polutan CO dengan data aktual konsentrasi CO yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya dengan menggunakan kecepatan angin 20 km/jam dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.8 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam



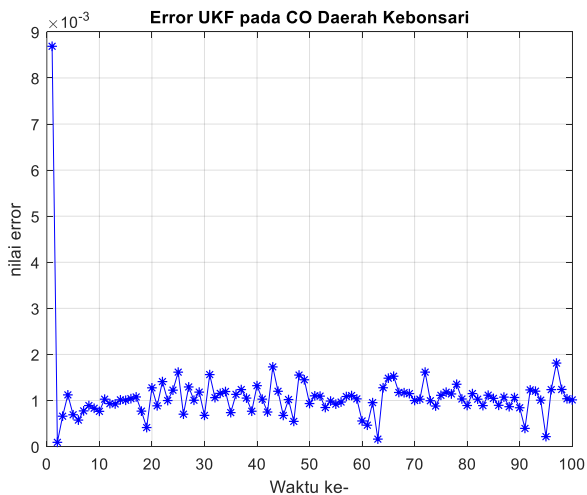
Gambar 4.9 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam



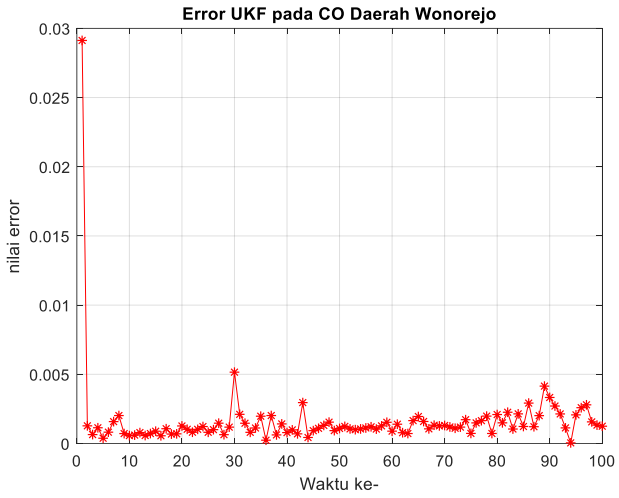
Gambar 4.10 Grafik Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam

Pada Gambar (4.8), (4.9), dan (4.10) menunjukkan perbandingan nilai estimasi konsentrasi CO dengan data aktual di setiap SUF dengan kecepatan angin 20 km/jam. Hasil estimasi konsentrasi polutan CO dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* berimpit dengan data aktual CO. Hal ini karena hasil estimasi konsentrasi polutan CO dengan *Unscented Kalman Filter* menghasilkan nilai RMSE yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan hasil estimasi CO pada gambar (4.8), (4.9), dan (4.10) telah valid. Nilai RMSE pada SUF 1 sebesar 0.0021, pada SUF 6 sebesar 0.0025, dan pada SUF 7 sebesar 0.0030 dengan waktu komputasi 4.418103 detik. Untuk mengetahui perbandingan antara nilai data *real* dan nilai estimasi konsentrasi CO dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter* dapat dilihat pada Lampiran 3.

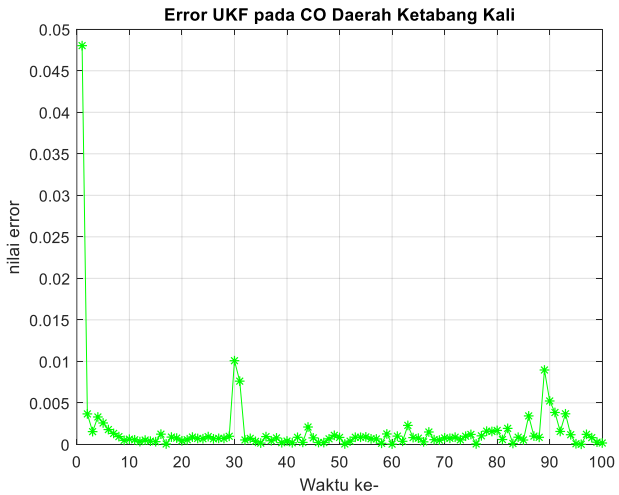
Berikut ini adalah grafik *error* dari estimasi konsentrasi polutan karbon monoksida CO menggunakan *Unscented Kalman Filter* akan ditunjukkan pada plot grafik dibawah ini :



Gambar 4.11 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 1 (Kebonsari)



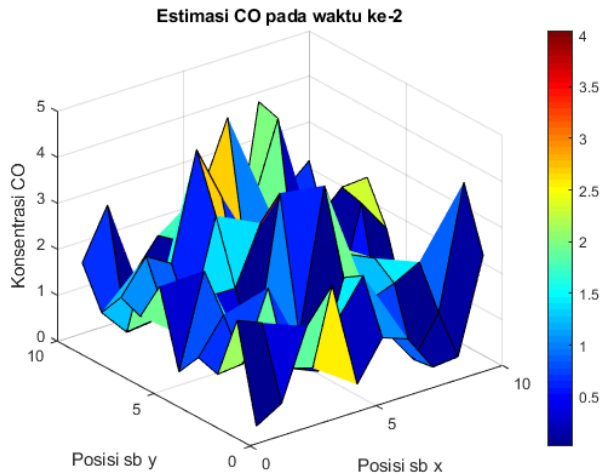
Gambar 4.12 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 6 (Wonorejo)



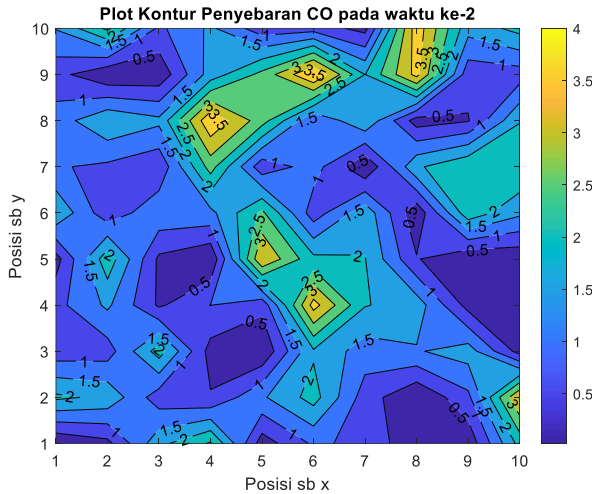
Gambar 4.13 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi CO pada SUF 7 (Ketabang Kali)

Berdasarkan Gambar (4.11), (4.12), dan (4.13) yang merupakan grafik *error* estimasi konsentrasi CO disetiap SUF menunjukkan bahwa grafik mengalami penurunan yang artinya nilai *error*nya semakin lama semakin berkurang atau mengalami penurunan. Sehingga dapat dikatakan bahwa jika nilai *error* menurun maka nilai estimasi akan mendekati data aktual sehingga nilai estimasi akan semakin valid.

Selanjutnya akan dianalisa penyebaran konsentrasi polutan CO yang ditampilkan dengan plot 3D dan plot kontur dari hasil estimasi konsentrasi polutan pada waktu ke-2, waktu ke-50, dan waktu ke-100 yang diambil sebagai *sample*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui estimasi polutan CO diseluruh lokasi di Kota Surabaya, baik lokasi tersebut terdapat alat ukur kualitas udara ataupun tidak terpasang alat ukur kualitas udara. Berikut ini adalah plot 3D dan plot kontur dari hasil estimasi konsentrasi polutan CO pada waktu ke-2, waktu ke-50, dan waktu ke-100 sebagai berikut :

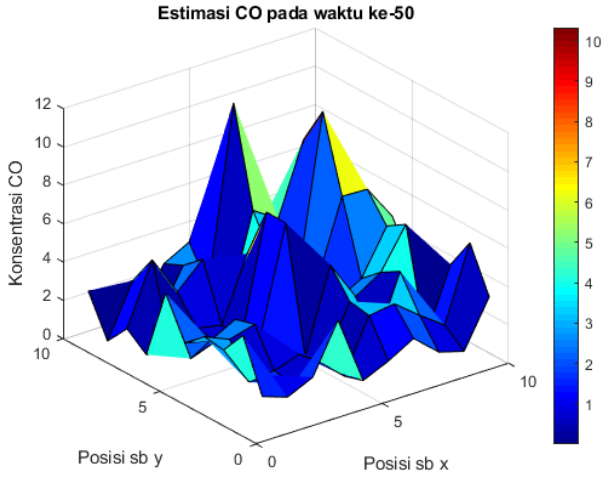


Gambar 4.14 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan CO Pada Waktu Ke-2

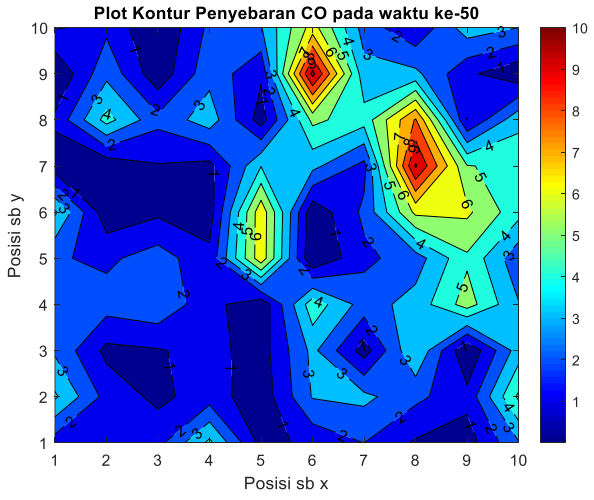


Gambar 4.15 Plot Kontur Penyebaran Polutan CO Pada Waktu Ke-2

Posisi sumbu x dan sumbu y pada plot estimasi 3D dan plot kontur penyebaran polutan menyatakan koordinat lokasi. Titik-Titik yang tersebar menunjukkan konsentrasi polutan CO pada titik tersebut dan warna dari titik-titik tersebut tergantung dari koordinat lokasinya. Jika diamati secara keseluruhan terdapat gradiasi beberapa warna berdasarkan tinggi rendahnya konsentrasi polutan CO. Pada Gambar (4.14) dan (4.15) diatas, didapatkan bahwa nilai konsentrasi polutan CO tertinggi terletak pada koordinat (6,9) yaitu pada daerah Pabean Cantian dengan konsentrasi CO sebesar $4.042 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Untuk konsentrasi polutan CO terendah pada koordinat (8,2) yaitu pada daerah Rungkut dengan konsentrasi CO sebesar $0.02288 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

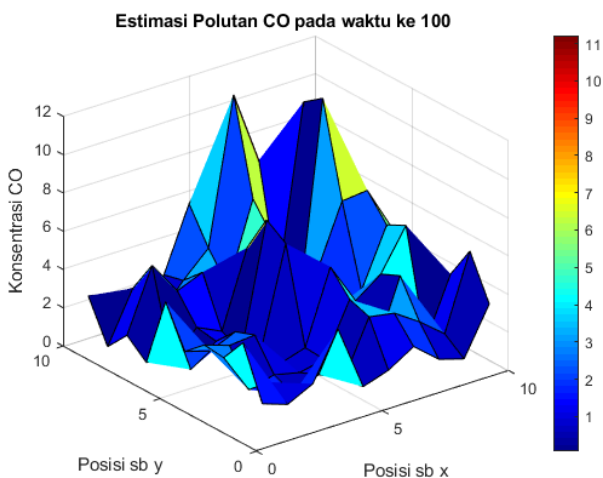


Gambar 4.16 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan CO Pada Waktu Ke-50

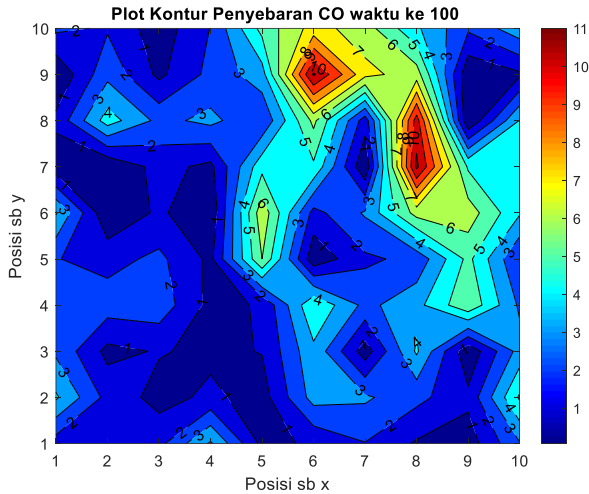


Gambar 4.17 Plot Kontur Penyebaran Polutan CO Pada Waktu Ke-50

Posisi sumbu x dan sumbu y pada plot estimasi 3D dan plot kontur penyebaran polutan menyatakan koordinat lokasi. Titik-Titik yang tersebar menunjukkan konsentrasi polutan CO pada titik tersebut dan warna dari titik-titik tersebut tergantung dari koordinat lokasinya. Jika diamati secara keseluruhan terdapat gradiasi beberapa warna berdasarkan tinggi rendahnya konsentrasi polutan CO. Pada Gambar (4.16) dan (4.17) diatas, didapatkan bahwa nilai konsentrasi polutan CO tertinggi terletak pada koordinat (6,9) yaitu pada daerah Pabean Cantian dengan konsentrasi CO sebesar $10.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Untuk konsentrasi polutan CO terendah pada koordinat (6,5) yaitu pada daerah Wonorejo dengan konsentrasi CO sebesar $0.001358 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Gambar 4.18 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan CO Pada Waktu Ke-100



Gambar 4.19 Plot Kontur Penyebaran Polutan CO Pada Waktu Ke-100

Posisi sumbu x dan sumbu y pada plot estimasi 3D dan plot kontur penyebaran polutan menyatakan koordinat lokasi. Titik-Titik yang tersebar menunjukkan konsentrasi polutan CO pada titik tersebut dan warna dari titik-titik tersebut tergantung dari koordinat lokasinya. Jika diamati secara keseluruhan terdapat gradiasi beberapa warna berdasarkan tinggi rendahnya konsentrasi polutan CO. Pada Gambar (4.18) dan (4.19) diatas, didapatkan bahwa nilai konsentrasi polutan CO tertinggi terletak pada koordinat (6,9) yaitu pada daerah Pabean Cantian dengan konsentrasi CO sebesar $11.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Untuk konsentrasi polutan CO terendah pada koordinat (9,8) yaitu pada daerah Selat Madura dengan konsentrasi CO sebesar $0.07094 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dari plot 3D hasil estimasi konsentrasi polutan pada waktu ke-2, waktu ke-50, dan waktu ke-100 diatas dapat diambil kesimpulan bahwa penyebaran konsentrasi polutan CO tidak menyebar secara merata karena setiap lokasi memiliki nilai konsentrasi polutan yang berbeda beda.

4.6.2 Simulasi dan Analisa Pembahasan Estimasi Nitrogen Dioksida (NO₂) dengan Data Pengukuran

Simulasi pada subbab ini dilakukan menggunakan kondisi awal kecepatan angin dimisalkan konstan, namun karena kecepatan angin bernilai konstan maka akan dilakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin terhadap tingkat akurasi pada hasil estimasi konsentrasi polutan. Besar kecepatan angin yang digunakan untuk simulasi ini menggunakan data rata-rata kecepatan angin dari data Stasiun BMKG Juanda Surabaya pada bulan Januari tahun 2018 dengan arah angin menuju ke arah barat. Selain itu pada simulasi ini menggunakan data pengukuran yang berupa data polutan yang ada dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya tahun 2018. Pada tahap ini akan dilakukan 10 simulasi untuk masing-masing kecepatan angin yang berbeda untuk menghitung rata-rata nilai RMSE pada konsentrasi polutan Nitrogen Dioksida (NO₂) di SUF1, SUF6, SUF7. Karena kecepatan angin dibuat konstan maka akan dibuat 10 simulasi RMSE per SUF dengan kecepatan angin yang berbeda serta lama waktu komputasi yang dibutuhkan pada simulasi. Dalam Tabel (4.4) dibawah ini akan diberikan kondisi awal konsentrasi polutan NO₂ sesuai dengan data awal konsentrasi NO₂ dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya sebagai berikut :

Tabel 4.4 Kondisi awal Konsentrasi Polutan NO₂

Lokasi Pengukuran	Konsentrasi NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Kebonsari/SUF 1 (5,2)	57.22999954
Wonorejo/SUF 6 (6,5)	33.65800095
Ketabang Kali /SUF 7 (6,6)	19.10099983

Berikut akan ditunjukkan RMSE *Unscented Kalman Filter* polutan NO₂ pada Tabel (4.5) dibawah ini :

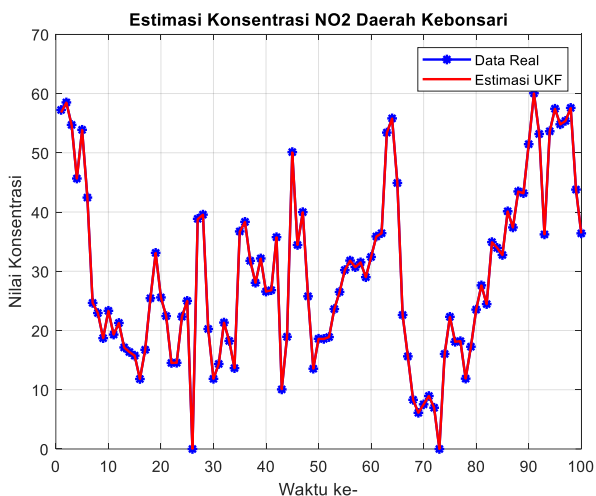
Tabel 4.5 RMSE Unscented Kalman Filter Polutan NO₂

Kecepatan Angin (Km/Jam)	Simulasi	RMSE Nitrogen Dioksida (NO ₂)			Waktu Komputasi (s)
		SUF 1 (5,2)	SUF 6 (6,5)	SUF 7 (6,6)	
10	1	0.0457	0.0322	0.0262	2.506517
	2	0.0477	0.0310	0.0278	2.834069
	3	0.0513	0.0364	0.0260	2.829449
	4	0.0520	0.0310	0.0259	2.890807
	5	0.0481	0.0318	0.0268	2.738862
	6	0.0513	0.0364	0.0260	3.487568
	7	0.0504	0.0286	0.0260	3.486268
	8	0.0484	0.0301	0.0272	2.948064
	9	0.0512	0.0338	0.0261	2.876942
	10	0.0492	0.0331	0.0273	3.468330
Rata-Rata RMSE		0.04953	0.03244	0.02653	3.006688
15	1	0.0447	0.0319	0.0266	2.755805
	2	0.0462	0.0334	0.0256	3.383010
	3	0.0440	0.0269	0.0267	3.488818
	4	0.0454	0.0305	0.0252	3.227799
	5	0.0494	0.0304	0.0261	3.638875
	6	0.0444	0.0286	0.0252	3.520087
	7	0.0496	0.0306	0.0268	3.579181
	8	0.0506	0.0305	0.0256	3.430925
	9	0.0483	0.0281	0.0259	3.566485
	10	0.0442	0.0348	0.0258	2.756505
Rata-Rata RMSE		0.04668	0.03057	0.02595	3.334749
20	1	0.0434	0.0288	0.0257	2.758176
	2	0.0441	0.0307	0.0260	3.042772
	3	0.0405	0.0339	0.0267	4.633638
	4	0.0416	0.0293	0.0242	3.536943
	5	0.0358	0.0241	0.0244	4.378697
	6	0.0437	0.0277	0.0261	3.333727
	7	0.0434	0.0292	0.0256	3.090905
	8	0.0427	0.0329	0.0254	3.612810
	9	0.0430	0.0341	0.0248	3.113145
	10	0.0414	0.0277	0.0257	3.243342
Rata-Rata RMSE		0.04196	0.02984	0.02546	3.474416

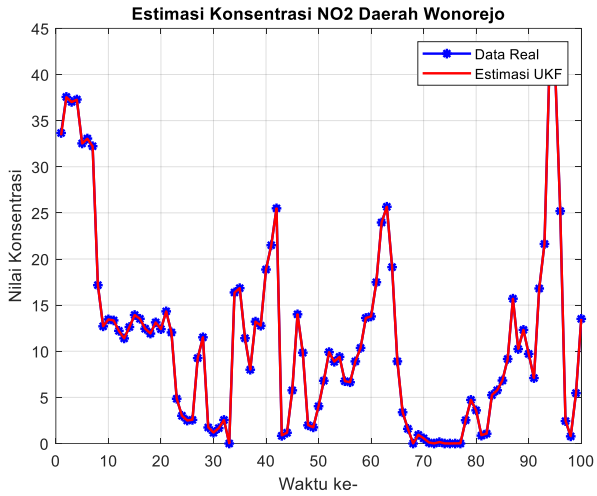
Pada Tabel (4.5) merepresentasikan error dan waktu komputasi estimasi konsentrasi polutan Nitrogen Dioksida (NO₂) dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter* dengan

kecepatan angin yang berbeda. Berdasarkan pada table diatas dapat dilihat bahwa nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) mengalami penurunan atau nilainya semakin kecil dengan kecepatan angin yang semakin tinggi. Karena RMSE adalah metode yang digunakan untuk membandingkan antara hasil estimasi dengan hasil pengukuran, sehingga dapat dilihat tingkat keakuratan metode *Unscented Kalman Filter* dalam melakukan proses estimasi. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa semakin besar kecepatan angin yang disimulasikan kedalam sistem maka akan mempengaruhi tingkat keakurasian nilai estimasi, sehingga nilai estimasi semakin valid dengan data sebenarnya.

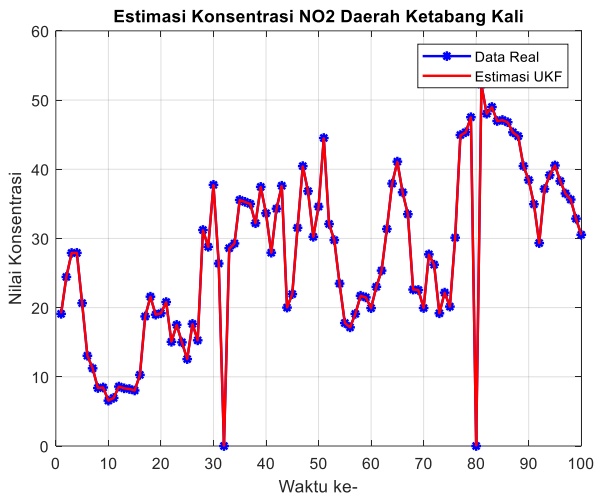
Berikut ini akan ditampilkan grafik perbandingan antara nilai estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan data aktual konsentrasi NO₂ yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya dengan menggunakan kecepatan angin 10 km/jam dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.20 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam



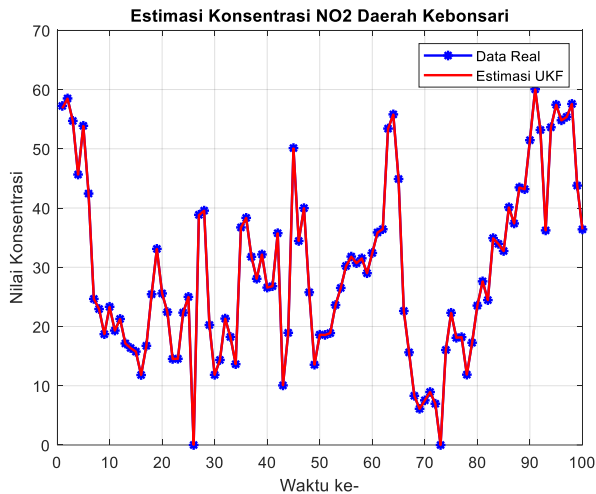
Gambar 4.21 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam



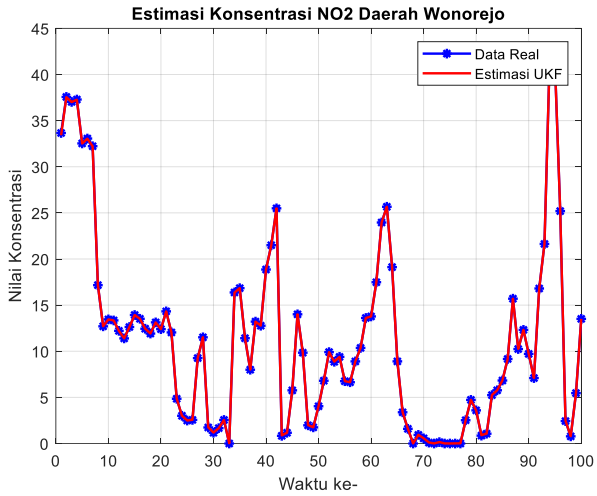
Gambar 4.22 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 10 km/jam

Pada Gambar (4.20), (4.21), dan (4.22) menunjukkan perbandingan nilai estimasi konsentrasi NO₂ dengan data aktual di setiap SUF dengan kecepatan angin 10 km/jam. Hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* berimpit dengan data aktual NO₂. Hal ini karena hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan *Unscented Kalman Filter* menghasilkan nilai RMSE yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan hasil estimasi NO₂ pada gambar (4.17), (4.18), dan (4.19) telah valid. Nilai RMSE pada SUF 1 sebesar 0.04953, pada SUF 6 sebesar 0.03244, dan pada SUF 7 sebesar 0.02653 dengan waktu komputasi 3.006688 detik.

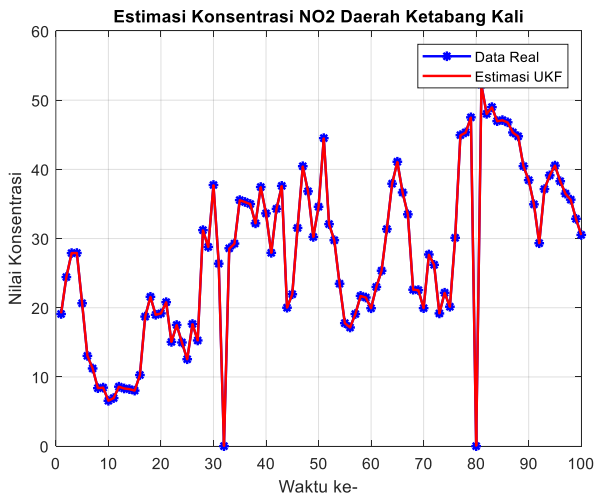
Grafik perbandingan antara nilai estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan data aktual konsentrasi NO₂ yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya dengan menggunakan kecepatan angin 15 km/jam dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.23 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam



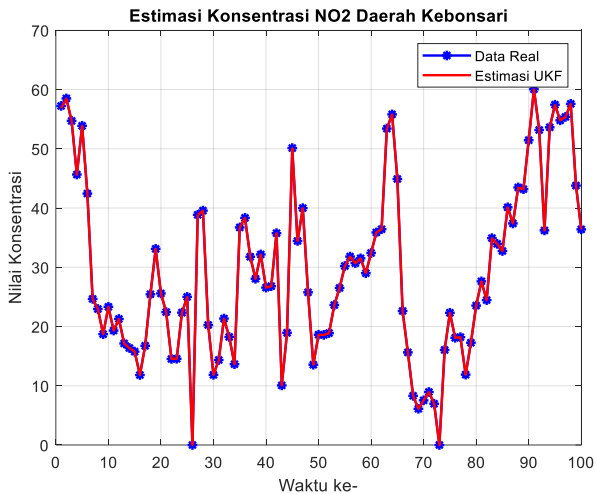
Gambar 4.24 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam



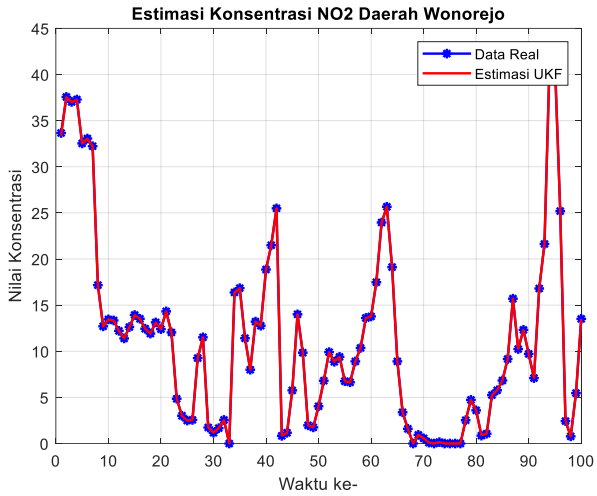
Gambar 4.25 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 15 km/jam

Pada Gambar (4.23), (4.24), dan (4.25) menunjukkan perbandingan nilai estimasi konsentrasi NO₂ dengan data aktual di setiap SUF dengan kecepatan angin 15 km/jam. Hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* berimpit dengan data aktual NO₂. Hal ini karena hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan *Unscented Kalman Filter* menghasilkan nilai RMSE yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan hasil estimasi NO₂ pada gambar (4.20), (4.21), dan (4.22) telah valid. Nilai RMSE pada SUF 1 sebesar 0.04668, pada SUF 6 sebesar 0.03057, dan pada SUF 7 sebesar 0.02595 dengan waktu komputasi 3.334749 detik.

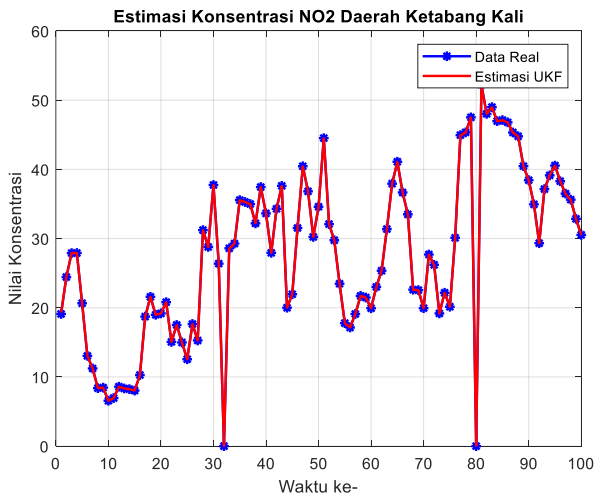
Grafik perbandingan antara nilai estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan data aktual konsentrasi NO₂ yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya dengan menggunakan kecepatan angin 20 km/jam dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.26 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 1 (Kebonsari) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam



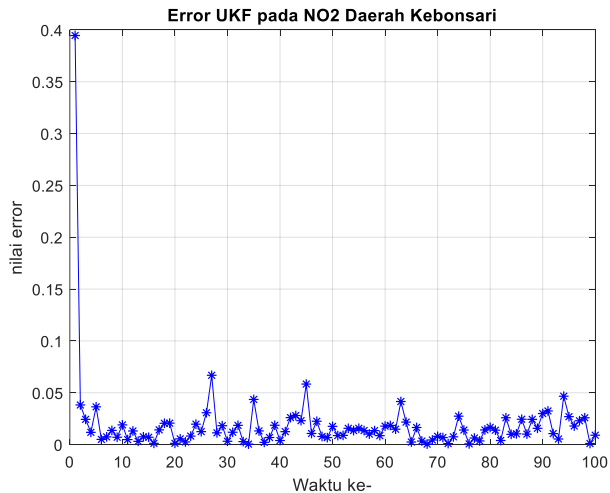
Gambar 4.27 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 6 (Wonorejo) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam



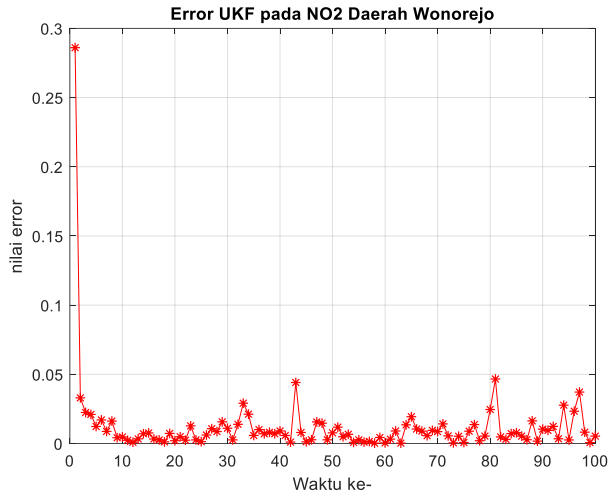
Gambar 4.28 Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 7 (Ketabang Kali) dengan Kecepatan Angin 20 km/jam

Pada Gambar (4.26), (4.27), dan (4.28) menunjukkan perbandingan nilai estimasi konsentrasi NO₂ dengan data aktual di setiap SUF dengan kecepatan angin 20 km/jam. Hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* berimpit dengan data aktual NO₂. Hal ini karena hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ dengan *Unscented Kalman Filter* menghasilkan nilai RMSE yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan hasil estimasi NO₂ pada Gambar (4.23), (4.24), dan (4.25) telah valid. Nilai RMSE pada SUF 1 sebesar 0.04196, pada SUF 6 sebesar 0.02984, dan pada SUF 7 sebesar 0.02546 dengan waktu komputasi 3.474416 detik. Untuk mengetahui perbandingan antara nilai data *real* dan nilai estimasi konsentrasi NO₂ dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter* dapat dilihat pada Lampiran 4.

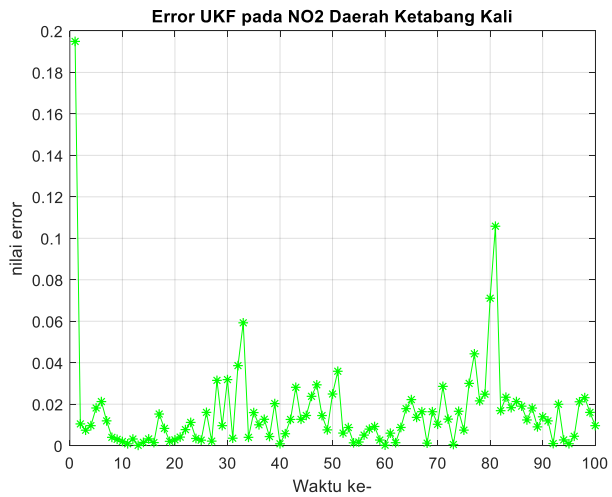
Berikut ini adalah grafik *error* dari estimasi konsentrasi polutan Nitrogen Dioksida (NO₂) menggunakan *Unscented Kalman Filter* akan ditunjukkan pada plot grafik dibawah ini :



Gambar 4.29 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 1 (Kebonsari)



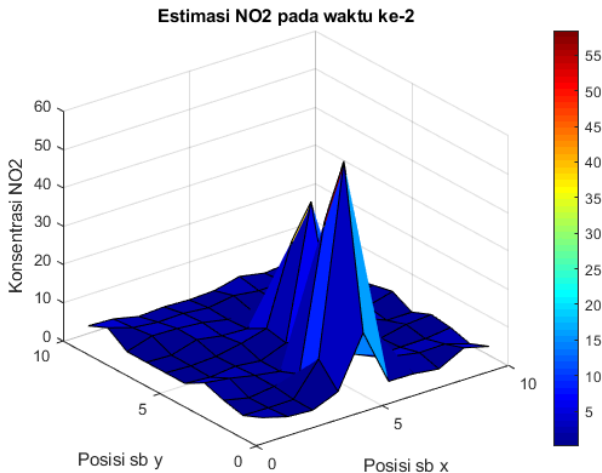
Gambar 4.30 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 6 (Wonorejo)



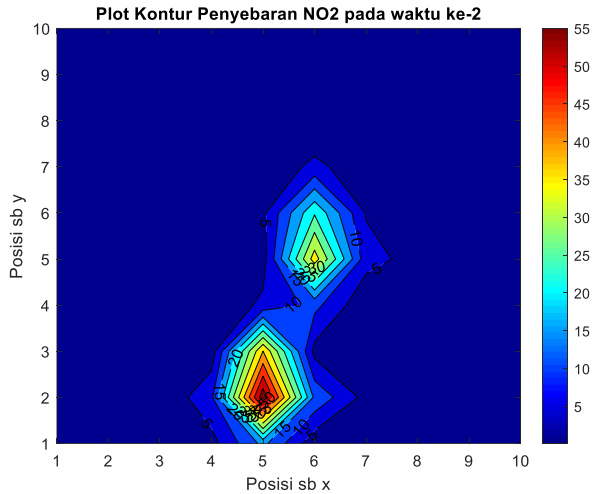
Gambar 4.31 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi NO₂ pada SUF 7 (Ketabang Kali)

Berdasarkan Gambar (4.29), (4.30), dan (4.31) yang merupakan grafik *error* estimasi konsentrasi NO₂ disetiap SUF menunjukkan bahwa grafik mengalami penurunan yang artinya nilai *error*nya semakin lama semakin berkurang atau mengalami penurunan. Sehingga dapat dikatakan bahwa jika nilai *error* menurun maka nilai estimasi akan mendekati data aktual sehingga nilai estimasi akan semakin valid.

Selanjutnya akan dianalisa penyebaran konsentrasi polutan NO₂ yang ditampilkan dengan plot 3D dan plot kontur dari hasil estimasi konsentrasi polutan pada waktu ke-2, waktu ke-50, dan waktu ke-100 yang diambil sebagai *sample*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui estimasi polutan NO₂ diseluruh lokasi di Kota Surabaya, baik lokasi tersebut terdapat alat ukur kualitas udara ataupun tidak terpasang alat ukur kualitas udara. Berikut ini adalah plot 3D dan plot kontur dari hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ pada waktu ke-2, waktu ke-50, dan waktu ke-100 sebagai berikut :

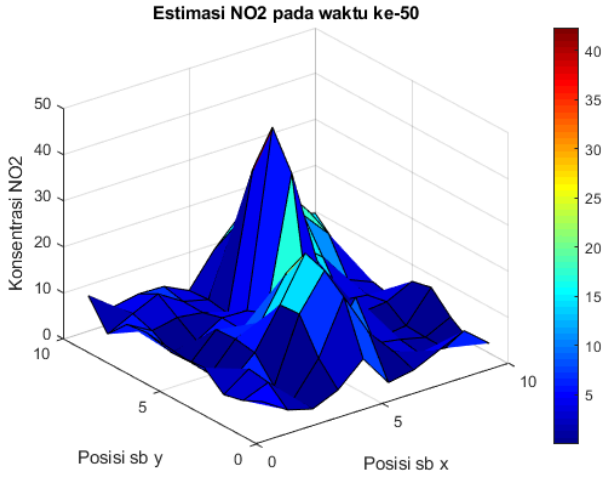


Gambar 4.32 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan NO₂ Pada Waktu Ke-2

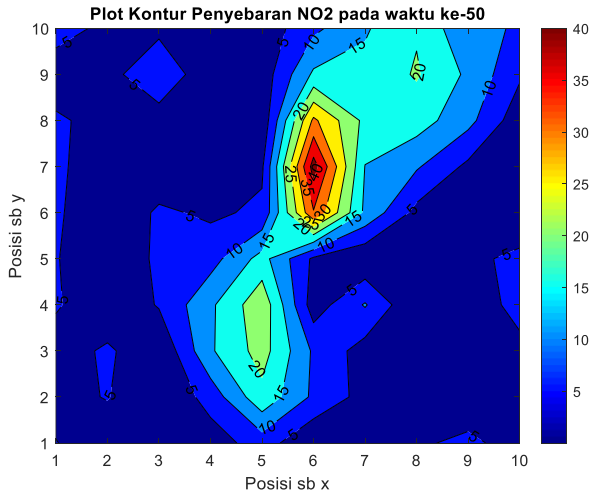


Gambar 4.33 Plot Kontur Penyebaran Polutan NO₂ Pada Waktu Ke-2

Posisi sumbu x dan sumbu y pada plot estimasi 3D dan plot kontur penyebaran polutan menyatakan koordinat lokasi. Titik-titik yang tersebar menunjukkan besarnya konsentrasi polutan NO₂ pada titik tersebut dan warna dari titik-titik tersebut tergantung dari koordinat lokasinya. Jika diamati secara keseluruhan terdapat gradiasi beberapa warna berdasarkan tinggi rendahnya konsentrasi polutan NO₂. Pada Gambar (4.32) dan (4.33) diatas, didapatkan bahwa nilai konsentrasi polutan NO₂ tertinggi terletak pada koordinat (5,2) yaitu pada daerah Kebonsari dengan konsentrasi NO₂ sebesar 58.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Untuk konsentrasi polutan NO₂ terendah pada koordinat (3,10) yaitu pada daerah Benowo dengan konsentrasi NO₂ sebesar 0.08568 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

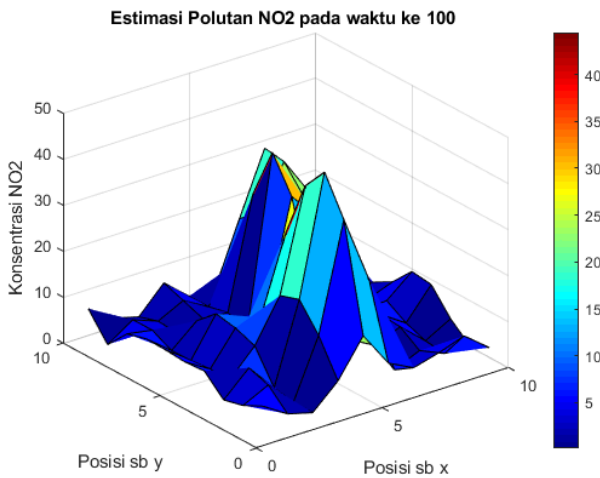


Gambar 4.34 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan NO₂ Pada Waktu Ke-50

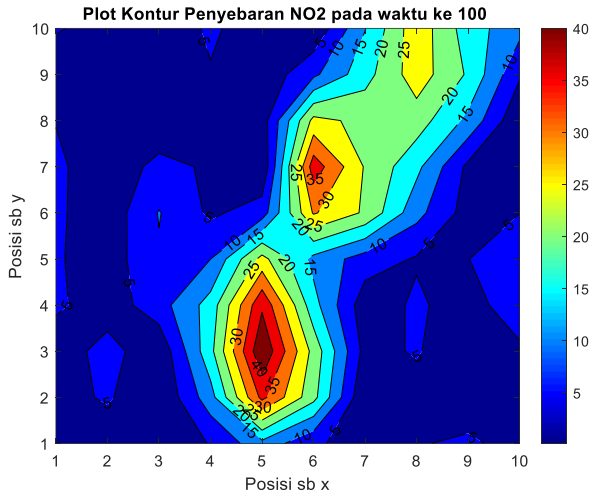


Gambar 4.35 Plot Kontur Penyebaran Polutan NO₂ Pada Waktu Ke-50

Posisi sumbu x dan sumbu y pada plot estimasi 3D dan plot kontur penyebaran poluran menyatakan koordinat lokasi. Titik-Titik yang tersebar menunjukkan konsentrasi polutan NO_2 pada titik tersebut dan warna dari titik-titik tersebut tergantung dari koordinat lokasinya. Jika diamati secara keseluruhan terdapat gradiasi beberapa warna berdasarkan tinggi rendahnya konsentrasi polutan NO_2 . Pada Gambar (4.34) dan (4.35) diatas, didapatkan bahwa nilai konsentrasi polutan NO_2 tertinggi terletak pada koordinat (6,7) yaitu pada daerah Bubutan dengan konsentrasi NO_2 sebesar $42.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Untuk konsentrasi polutan NO_2 terendah pada koordinat (3,2) yaitu pada daerah Lakarsantri dengan konsentrasi NO_2 sebesar $0.004067 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Gambar 4.36 Plot Estimasi 3D Konsentrasi Polutan NO_2 Pada Waktu Ke-100



Gambar 4.37 Plot Kontur Penyebaran Polutan NO₂ Pada Waktu Ke-100

Posisi sumbu x dan sumbu y pada plot estimasi 3D dan plot kontur penyebaran polutan menyatakan koordinat lokasi. Titik-titik yang tersebar menunjukkan konsentrasi polutan NO₂ pada titik tersebut dan warna dari titik-titik tersebut tergantung dari koordinat lokasinya. Jika diamati secara keseluruhan terdapat gradiasi beberapa warna berdasarkan tinggi rendahnya konsentrasi polutan NO₂. Pada Gambar (4.36) dan (4.37) diatas, didapatkan bahwa nilai konsentrasi polutan NO₂ tertinggi terletak pada koordinat (5,3) yaitu pada daerah Wiyung dengan konsentrasi NO₂ sebesar 44.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Untuk konsentrasi polutan NO₂ terendah pada koordinat (10,2) yaitu pada daerah Selat Madura dengan konsentrasi NO₂ sebesar 0.1351 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dari plot 3D hasil estimasi konsentrasi polutan pada waktu ke-2, waktu ke-50, dan waktu ke-100 diatas dapat diambil kesimpulan bahwa penyebaran konsentrasi polutan NO₂ tidak menyebar secara merata karena setiap lokasi memiliki nilai konsentrasi polutan yang berbeda beda.

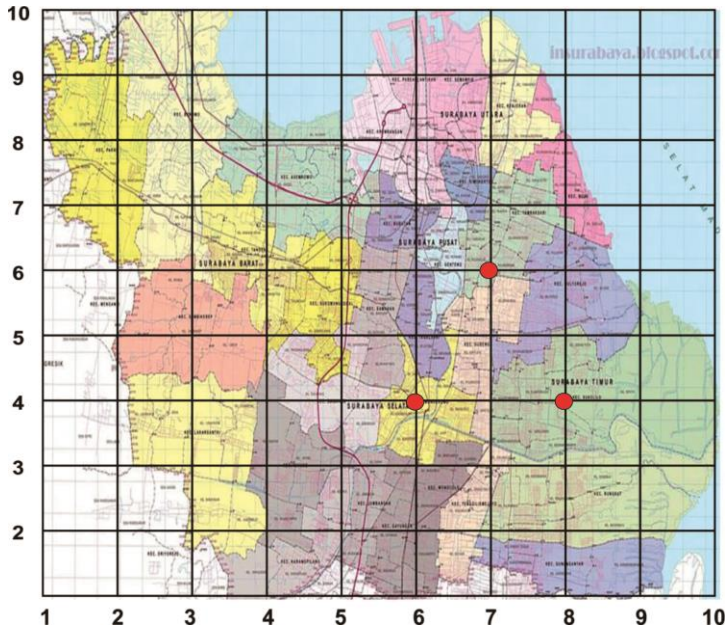
4.6.3 Simulasi dan Analisa Pembahasan Estimasi CO dan NO₂ Tanpa Data Pengukuran

Pada bab ini akan dilakukan simulasi estimasi konsentrasi CO dan NO₂ pada beberapa lokasi di Surabaya yang tidak terdapat alat pengukur kualitas udara. Karena jumlah alat pengukur kualitas udara (SUF) yang berfungsi di Surabaya hanya 3 SUF di titik yang berbeda yaitu di Kebonsari, Wonorejo, dan Ketabang Kali maka dirasa masih kurang bisa mewakili kondisi polusi udara di Kota Surabaya sehingga dengan menggunakan *Unscented Kalman Filter* dapat dilakukan estimasi kondisi konsentrasi polutan CO dan NO₂ pada ruas wilayah di Kota Surabaya yang tidak terdapat alat pengukur kualitas udara sehingga lokasi tersebut dapat diketahui besarnya konsentrasi polutannya.

Simulasi ini akan ditambahkan lokasi-lokasi yang tidak terpasang alat pengukur kualitas udara tetapi mobilitas di daerah tersebut sangat tinggi. Lokasi yang diambil untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Jalan Arif Rahman Hakim
2. Terminal Joyoboyo
3. Stasiun Gubeng

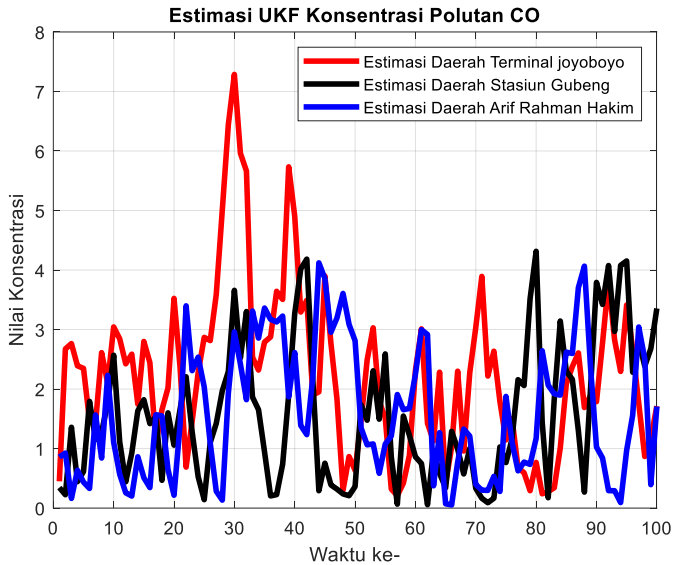
Untuk nilai awal estimasi pada simulasi konsentrasi polutan tanpa menggunakan alat ukur kualitas udara diasumsikan memiliki nilai konsentrasi $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atau tidak ada polusi. Berikut ini adalah koordinat titik lokasi yang tidak terdapat alat pengukur kualitas udara pada peta pendiskritan Kota Surabaya :



Gambar 4.38 Titik Koordinat Lokasi Tanpa Alat Ukur pencemaran udara di Kota Surabaya

Berdasarkan Gambar (4.38) ketiga titik tersebut merupakan koordinat lokasi yang terdapat alat ukur kualitas udara dan Lokasi pada titik koordinat (6,4) menunjukkan lokasi daerah Terminal Joyoboyo, titik koordinat (7,6) menunjukkan lokasi daerah Stasiun Gubeng, dan pada titik koordinat (8,4) menunjukkan lokasi daerah Arif Rahman Hakim yang merupakan lokasi tanpa alat ukur kualitas udara yang dipilih. Pada simulasi ini inisialisasi awal nilai dianggap nol karena simulasi ini dilakukan tanpa memasukan data pengukuran.

Berikut ini akan ditampilkan grafik estimasi konsentrasi polutan CO pada lokasi-lokasi yang tidak dipasang alat ukur kualitas udara yaitu Jalan Arif Rahman Hakim, Terminal Joyoboyo, dan Stasiun Gubeng. Estimasi konsentrasi polutan CO ketiga tempat tersebut sebagai berikut :



Gambar 4.39 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Tanpa Data Pengukuran

Berdasarkan grafik estimasi pada Gambar (4.39) diperoleh hasil estimasi konsentrasi polutan CO tertinggi dan terendah dari 3 lokasi yang sudah ditetapkan. Berikut akan ditampilkan konsentrasi polutan CO tertinggi dan terendah pada daerah Terminal Joyoboyo, Stasiun Gubeng, dan Jalan Arif Rahman Hakim yang disajikan pada table dibawah ini :

Tabel 4.6 Estimasi Konsentrasi Tertinggi Polutan CO pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran

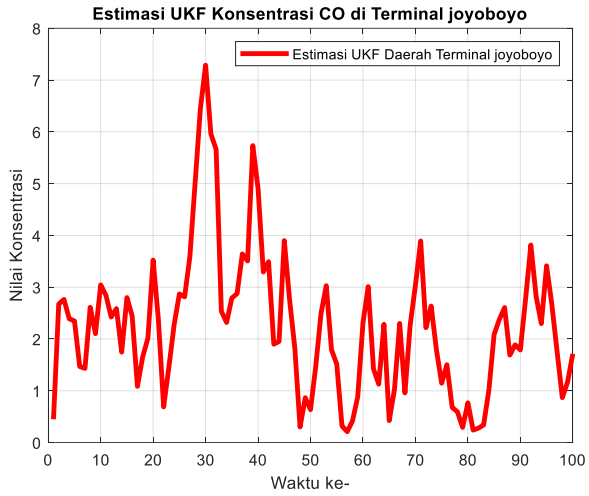
Lokasi Pengamatan	Pengamatan ke-	Pukul	UKF
Terminal Joyoboyo (6,4)	30	15.00	7.2870
Stasiun Gubeng (7,6)	80	16.00	4.3152
Arif Rahman Hakim (8,4)	44	22.00	4.1213

Tabel 4.7 Estimasi Konsentrasi Terendah Polutan CO pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran

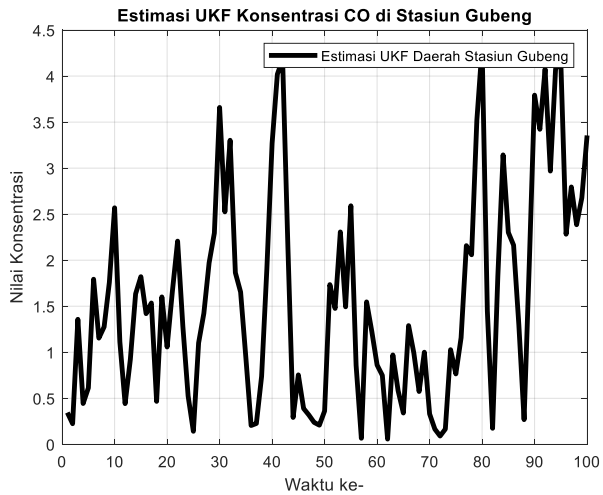
Lokasi Pengamatan	Pengamatan ke-	Pukul	UKF
Terminal Joyoboyo (6,4)	57	04.30	0.2093
Stasiun Gubeng (7,6)	62	07.00	0.0569
Arif Rahman Hakim (8,4)	66	09.00	0.0528

Dari Tabel (4.6) dan (4.7) diperoleh hasil estimasi konsentrasi polutan CO paling tinggi terletak pada daerah Terminal Joyoboyo dengan koordinat (6,4) yaitu pada waktu pengamatan ke 30 dan pada Pukul 15.00 WIB sebesar 7.2870 $\mu g/m^3$. Sedangkan untuk konsentrasi polutan CO terendah terletak pada daerah Jalan Arif Rahman Hakim dengan koordinat (8,4) yaitu pada waktu pengamatan ke 66 dan pada pukul 09.00 WIB sebesar 0.0528 $\mu g/m^3$.

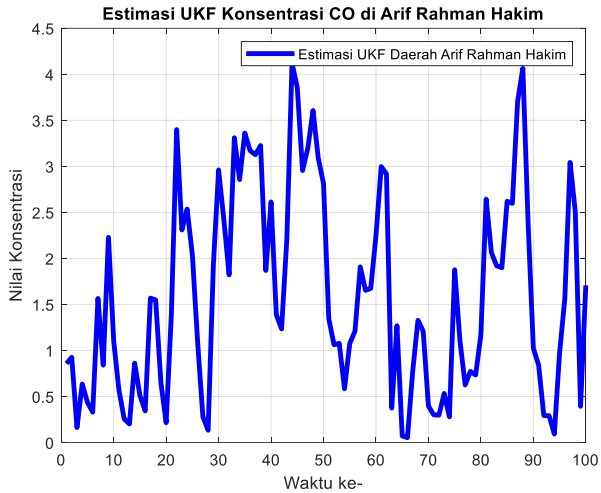
Selanjutnya, akan ditampilkan grafik estimasi konsentrasi CO pada masing-masing lokasi yang tidak dipasang alat ukur kualitas udara yaitu Terminal Joyoboyo, Stasiun Gubeng, Jalan Arif Rahman Hakim sebagai berikut :



Gambar 4.40 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Daerah Terminal Joyoboyo



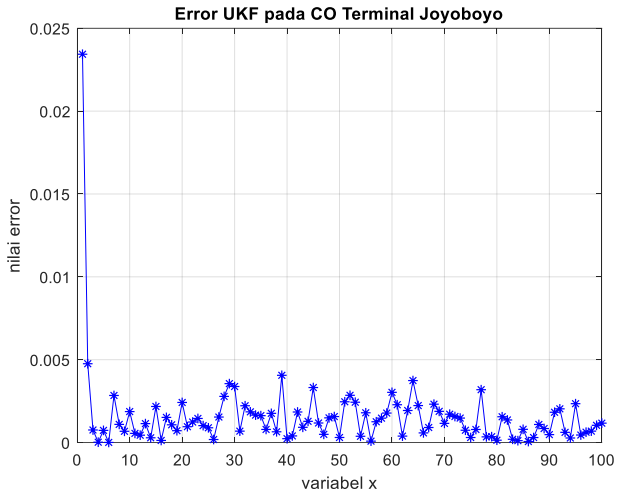
Gambar 4.41 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Daerah Stasiun Gubeng



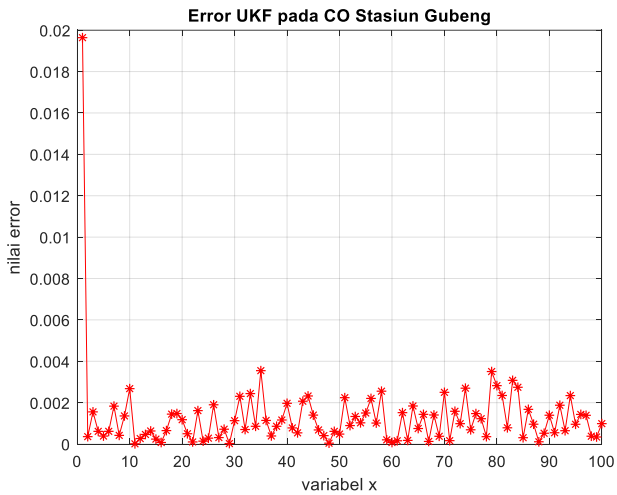
Gambar 4.42 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan CO Daerah Arif Rahman Hakim

Dari grafik pada Gambar (4.40), (4.41), dan (4.42) diperoleh hasil estimasi konsentrasi polutan CO tanpa data pengukuran dengan nilai RMSE pada daerah Terminal Joyoboyo sebesar 0.0029, pada daerah Stasiun Gubeng sebesar 0.0024, dan pada daerah Arif Rahman Hakim sebesar 0.0021.

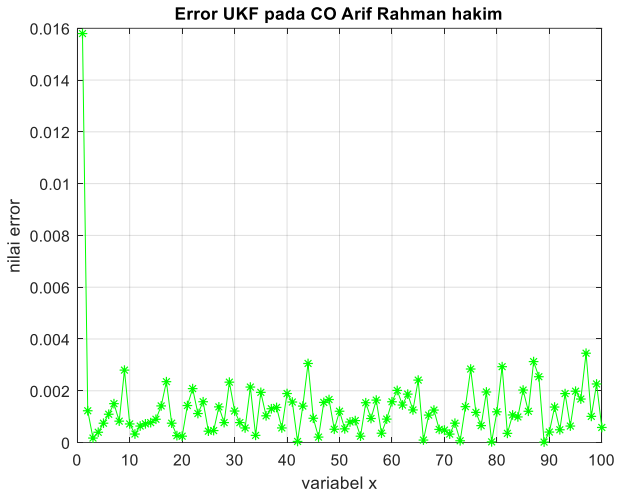
Selanjutnya akan ditampilkan grafik *error* dari estimasi konsentrasi polutan karbon monoksida (CO) tanpa data pengukuran menggunakan *Unscented Kalman Filter* akan ditunjukkan pada plot grafik dibawah ini :



Gambar 4.43 Grafik *Error Estimasi Konsentrasi CO* Daerah Terminal Joyoboyo



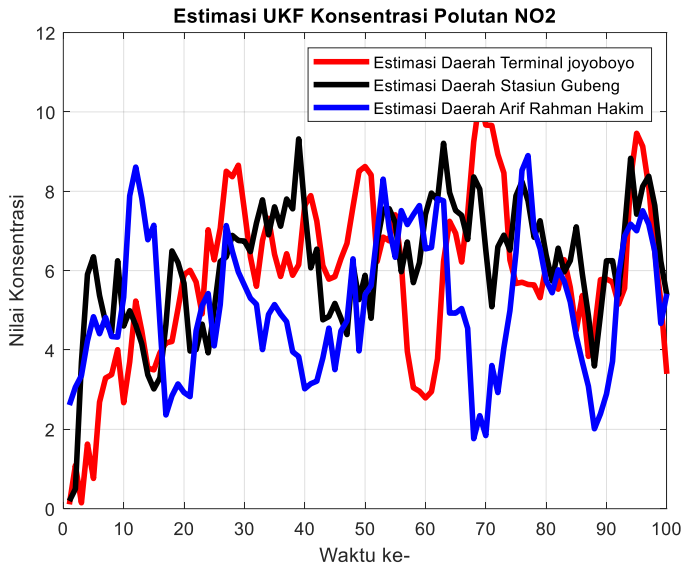
Gambar 4.44 Grafik *Error Estimasi Konsentrasi CO* Daerah Stasiun Gubeng



Gambar 4.45 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi CO Daerah Arif Rahman Hakim

Berdasarkan Gambar (4.43), (4.44), dan (4.45) yang merupakan grafik *error* estimasi konsentrasi CO disetiap lokasi menunjukkan bahwa grafik mengalami penurunan yang artinya nilai *error*nya semakin lama semakin berkurang atau mengalami penurunan. Sehingga dapat dikatakan bahwa jika nilai *error* menurun maka nilai estimasi akan mendekati data sistem.

Berikutnya, akan ditampilkan grafik simulasi estimasi konsentrasi polutan NO_2 pada lokasi-lokasi yang tidak dipasang alat ukur kualitas udara yaitu Jalan Arif Rahman Hakim, Terminal Joyoboyo, dan Stasiun Gubeng. Estimasi konsentrasi polutan NO_2 ketiga tempat tersebut sebagai berikut :



Gambar 4.46 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO_2 Tanpa Data Prngukuran

Berdasarkan grafik estimasi pada Gambar (4.46) diperoleh hasil estimasi konsentrasi polutan NO_2 tertinggi dan terendah dari 3 lokasi yang sudah ditetapkan. Berikut akan ditampilkan konsentrasi polutan NO_2 tertinggi dan terendah pada daerah Terminal Joyoboyo, Stasiun Gubeng, dan Jalan Arif Rahman Hakim yang disajikan pada table dibawah ini :

Tabel 4.8 Estimasi Konsentrasi Tertinggi Polutan NO₂ pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran

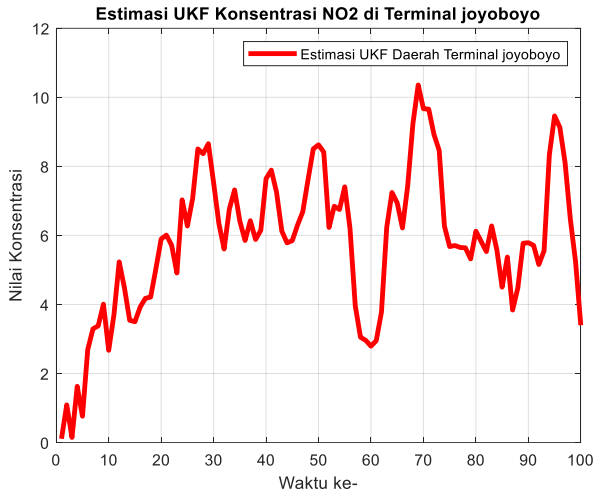
Lokasi Pengamatan	Pengamatan ke-	Pukul	UKF
Terminal Joyoboyo (6,4)	69	10.30	10.3569
Stasiun Gubeng (7,6)	39	19.30	9.3199
Arif Rahman Hakim (8,4)	77	14.30	8.8997

Tabel 4.9 Estimasi Konsentrasi Terendah Polutan NO₂ pada 3 Lokasi Tanpa Data Pengukuran

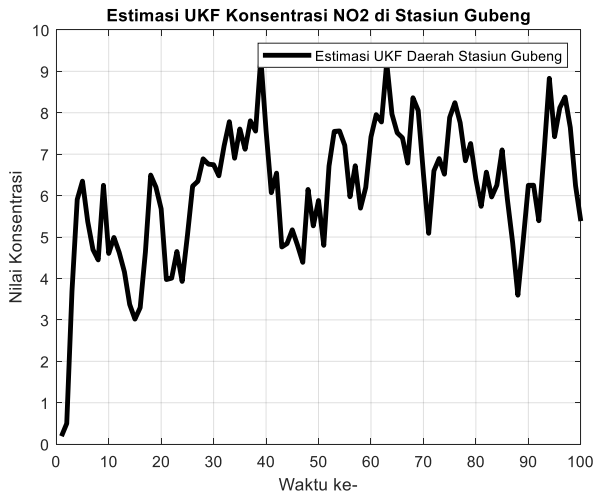
Lokasi Pengamatan	Pengamatan ke-	Pukul	UKF
Terminal Joyoboyo (6,4)	1	00.30	0.1097
Stasiun Gubeng (7,6)	1	00.30	0.1931
Arif Rahman Hakim (8,4)	68	10.00	1.7648

Dari Tabel (4.8) dan (4.9) diperoleh hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ paling tinggi terletak pada daerah Terminal Joyoboyo dengan koordinat (6,4) yaitu pada waktu pengamatan ke 69 dan pada Pukul 10.30 WIB sebesar 10.3569 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sedangkan untuk konsentrasi polutan NO₂ terendah terletak pada daerah Terminal Joyoboyo dengan koordinat (6,4) yaitu pada waktu pengamatan ke 1 dan pada pukul 00.30 WIB sebesar 0.1097 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

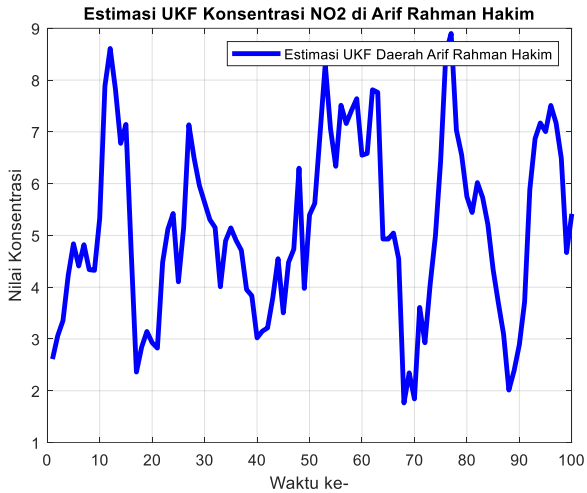
Selanjutnya, akan ditampilkan grafik estimasi konsentrasi NO₂ pada masing-masing lokasi yang tidak dipasang alat ukur kualitas udara yaitu Terminal Joyoboyo, Stasiun Gubeng, Jalan Arif Rahman Hakim sebagai berikut :



Gambar 4.47 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO₂ Daerah Terminal Joyoboyo



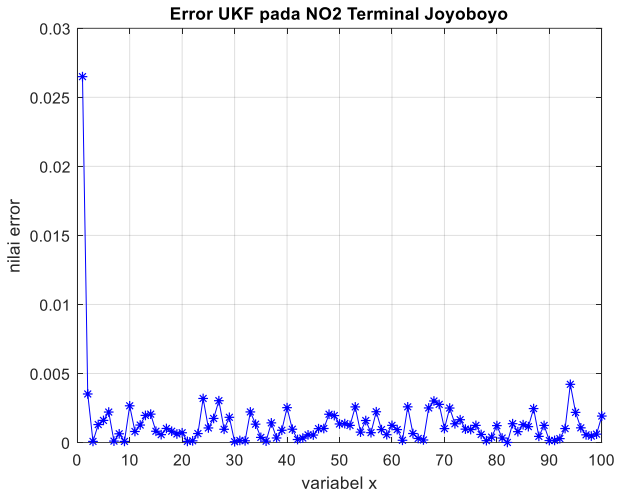
Gambar 4.48 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO₂ Daerah Stasiun Gubeng



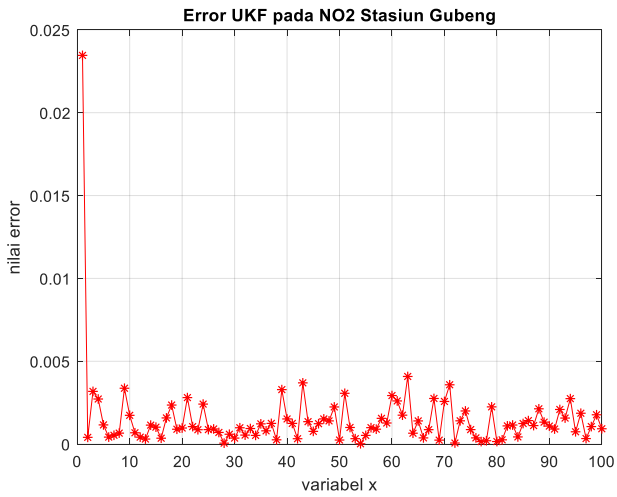
Gambar 4.49 Estimasi UKF pada Konsentrasi Polutan NO₂ Daerah Arif Rahman Hakim

Dari grafik pada Gambar (4.47), (4.48), dan (4.49) diperoleh hasil estimasi konsentrasi polutan NO₂ tanpa data pengukuran dengan nilai RMSE pada daerah Terminal Joyoboyo sebesar 0.0030, pada daerah Stasiun Gubeng sebesar 0.0028, dan pada daerah Arif Rahman Hakim sebesar 0.0032.

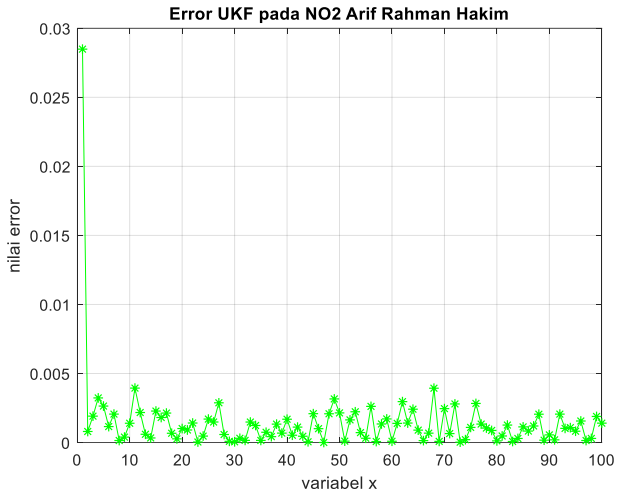
Selanjutnya akan ditampilkan grafik *error* dari estimasi konsentrasi polutan nitrogen dioksida (NO₂) tanpa data pengukuran menggunakan *Unscented Kalman Filter* akan ditunjukkan pada plot grafik dibawah ini :



Gambar 4.50 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi NO₂ Daerah Terminal Joyoboyo



Gambar 4.51 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi NO₂ Daerah Stasiun Gubeng



Gambar 4.52 Grafik *Error* Estimasi Konsentrasi NO₂ Daerah Arif Rahman Hakim

Berdasarkan Gambar (4.50), (4.51), dan (4.52) yang merupakan grafik *error* estimasi konsentrasi NO₂ disetiap lokasi menunjukkan bahwa grafik mengalami penurunan yang artinya nilai *error*nya semakin lama semakin berkurang atau mengalami penurunan. Sehingga dapat dikatakan bahwa jika nilai *error* menurun maka nilai estimasi akan mendekati data sistem.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

Pada bab ini berisi kesimpulan yang dihasilkan berdasarkan analisa dan pembahasan hasil simulasi dari bab sebelumnya serta saran yang diberikan jika penelitian ini ingin dikembangkan.

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penulis pada penelitian yang telah dilakukan, yaitu :

1. Model polusi udara dapat dimodelkan dari penggabungan persamaan Difusi dan Adveksi sehingga menghasilkan model persamaan diskrit yang dapat diestimasi menggunakan *Unscented Kalman Filter*.
2. Berdasarkan analisis hasil dari simulasi yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa metode *Unscented Kalman Filter* dapat digunakan untuk mengestimasi konsentrasi polutan Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Dioksida (NO₂) pada pencemaran udara dengan data pengukuran atau tanpa data pengukuran dengan nilai *error* kurang dari 1 serta grafik errornya mengalami penurunan sehingga menghasilkan hasil estimasi yang mendekati dari data sebenarnya. Hal ini dibuktikan dari nilai RMSE pada hasil estimasi konsentrasi CO sebesar 0.0021 pada SUF 1, 0.0025 pada SUF 6, dan 0.0030 pada SUF 7. Untuk nilai RMSE hasil estimasi konsentrasi NO₂ sebesar 0.04196 pada SUF 1, 0.02984 pada SUF 6, dan 0.02546 pada SUF 7.
3. Untuk penyebaran konsentrasi polutan CO tertinggi dengan menggunakan data pengukuran berdasarkan plot 3D dan plot kontur pada waktu ke-100 terjadi di daerah Pabean Cantian dengan konsentrasi CO sebesar 11.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dan untuk konsentrasi polutan CO terendah terjadi di daerah

Selat Madura dengan konsentrasi CO sebesar $0.07094 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4. Untuk penyebaran konsentrasi polutan NO_2 tertinggi dengan menggunakan data pengukuran berdasarkan plot 3D dan plot kontur pada waktu ke-100 terjadi di daerah Wiyung dengan konsentrasi NO_2 sebesar $44.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dan untuk konsentrasi polutan NO_2 terendah terjadi di daerah Selat Madura dengan konsentrasi NO_2 sebesar $0.1351 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
5. Untuk estimasi menggunakan *Unscented Kalman Filter*, lebih baik menggunakan data pengukuran (data *real*) agar hasil estimasi bisa mendekati hasil *real*. Hal ini dibuktikan saat estimasi di lokasi yang tidak dipasang alat ukur, hasil estimasinya sangat *random* dan tiap melakukan *running program* menghasilkan hasil estimasi yang berbeda.

5.2 Saran

Adapun saran dari penulis yang dapat dilakukan untuk penelentian selanjutnya, yaitu :

1. Menambah lebih banyak titik pengukuran pada proses estimasi selanjutnya dengan menambahkan banyak sampel alat pengukur kualitas udara atau dengan melakukan penelitian langsung dilapangan untuk memperbanyak sampel titik pengukuran.
2. Untuk penelitian selanjutnya disarankan menggunakan model polusi udara 3D sehingga dapat diketahui dalam ketinggian berapa masih terdapat polutan di udara.
3. Menggunakan metode estimasi yang lain untuk mengestimasi konsentrasi polutan sehingga dapat digunakan sebagai pembanding untuk menemukan metode terbaik dalam mengestimasi konsentrasi polutan di udara.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peraturan Indonesia. (1999). **Undang-Undang Nomor 41 Tahun 1999 tentang pengendalian pencemaran udara.** Lembaran Negara RI Tahun 1999, No. 88. Jakarta : Sekretarian Negara.
- [2] Simanjuntak, A.G. (2007). **Pencemaran udara.** Bulletin Limbah Vol. 11 No.1 Pusat Teknologi Limbah Radioaktif.
- [3] Apriliani, E., Hanafi, Wahyuningsih. (2011). **Metode Estimasi Penyebaran Polutan di Udara.** Jurnal Purifikasi Volume 12 No.2, Hal.53-62. Surabaya : Jurusan Matematika ITS.
- [4] Suyono. (2014). **Pencemaran Kesehatan Lingkungan.** Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EGC.
- [5] Metia S., Oduro S.D., Sinha A.P. (2020) **Pollutant Profile Estimation Using Unscented Kalman Filter.** In: Basu T., Goswami S., Sanyal N. (eds) *Advances in Control, Signal Processing and Energy Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 591. Springer, Singapore.
- [6] Wardhana, W. A. (2001). **Dampak Pencemaran Lingkungan.** Penerbit ANDI. Yogyakarta.
- [7] Klaasen, Curtis D., Watkin, J.B.,dkk. (1999). **The basic Science of Poison Fifth edition,** Companion Handbook, McGraw-Hill, USA, .
- [8] Rax, R. (1995) **Pemantauan kualitas udara dan tingkat kebisingan DKI Jakarta 1994-1995. Lokakarya Baku Mutu Udara Ambient dan Tingkat Kebisingan di Wilayah DKI Jakarta.** KP2LDKI, Jakarta.
- [9] Nevers, N. D. (1995). **Air Pollution Control Engineering.** McGraw-Hill Inc. New York.
- [10] Causon, D.M., Migham, C.G. (2010). **Introductory Finite Difference Methods for PDEs.** Manchester Metropolitan University.
- [11] Welch, G.,Bishop, G.(2006). **An Introduction to The Kalman Filter.** Chapel Hill: University of North Carolina.

- [12] Haykin, S., (2001). **Kalman Filtering and Neural Network**. John Wiley & Sons, inc.
- [13] Julier, S. J., Uhlmann, J. K. (2004). **Unscented Filtering and Nonlinear Estimation**. Proceedings of the IEEE , vol. 92, pp. 401-422.
- [14] Liu., Husain, T.T. (2012). **Discretization: An Enabling Technique, Arizona** : Departement of Computer Science and Engineering-arizona State University.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data awal konsentrasi polutan Karbon Monoksida (CO) dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7).

No	Pukul	SUF 1 (Kebonsari)	SUF 6 (Wonorejo)	SUF 7 (Ketabang Kali)
1	00:30:00	1.1875	1.8669	0.7665
2	01:00:00	1.4288	2.129	0.72343
3	01:30:00	1.1761	2.0389	1.1901
4	02:00:00	0.66785	2.7425	0.7048
5	02:30:00	0.513	2.6268	0.51146
6	03:00:00	0.5016	2.3408	0.58982
7	03:30:00	0.4218	1.5588	0.55302
8	04:00:00	0.32585	0.50585	0.31515
9	04:30:00	0.31255	0.44483	0.33476
10	05:00:00	0.37525	0.46791	0.28814
11	05:30:00	0.2926	0.50335	0.32203
12	06:00:00	0.30115	0.47984	0.47863
13	06:30:00	0.3344	0.56541	0.56226
14	07:00:00	0.32585	0.6072	0.72916
15	07:30:00	0.3382	0.56024	0.8875
16	08:00:00	0.3363	0.52654	0.55211
17	08:30:00	0.323	0.48457	0.88507
18	09:00:00	0.5111	0.49877	0.735
19	09:30:00	0.90725	0.56456	0.70835
20	10:00:00	0.71345	0.33305	0.76972
21	10:30:00	0.76475	0.24167	0.72291
22	11:00:00	0.47595	0.26092	0.52713

23	11:30:00	0.47595	0.22799	0.44748
24	12:00:00	0.3496	0.09607	0.35644
25	12:30:00	0	0.21812	0.2104
26	13:00:00	0.2774	0.29786	0.27215
27	13:30:00	0.1805	0.02795	0.20498
28	14:00:00	0.2755	0.33054	0.29153
29	14:30:00	0.25555	0.17562	0.17151
30	15:00:00	0.59565	0.09494	5.6467
31	15:30:00	0.30115	0.27063	0.9297
32	16:00:00	0.33915	0.12578	0.75834
33	16:30:00	0.3173	0.36554	0.67309
34	17:00:00	0.2736	0.4718	0.84984
35	17:30:00	0.52915	0	0.92951
36	18:00:00	0.50255	0.52888	0.80557
37	18:30:00	0.4085	0.18721	1.2669
38	19:00:00	0.4313	0.47146	1.1183
39	19:30:00	0.6346	0.4799	1.4873
40	20:00:00	0.46265	0.74975	1.5583
41	20:30:00	0.4826	0.93783	1.7741
42	21:00:00	0.6745	1.1296	1.6607
43	21:30:00	0.24035	0	1.6891
44	22:00:00	0.171	0	0.54234
45	22:30:00	0.456	0.1015	0.35838
46	23:00:00	0.5073	0.36754	0.8546
47	23:30:00	0.84455	0.33434	1.0133
48	00:00:00	0.5054	0.00155	0.7933
49	00:30:00	0.2451	0	0.41857
50	01:00:00	0.3439	0	0.26887
51	01:30:00	0.34485	0.12555	0.61172

52	02:00:00	0.35435	0.2821	0.77104
53	02:30:00	0.51965	0.34524	0.67922
54	03:00:00	0.5776	0.36358	0.61941
55	03:30:00	0.66215	0.30163	0.53114
56	04:00:00	0.70015	0.22782	0.55597
57	04:30:00	0.64885	0.27109	0.5986
58	05:00:00	0.58425	0.29688	0.89964
59	05:30:00	0.5757	0.50187	1.8993
60	06:00:00	0.86925	0.79298	2.0976
61	06:30:00	1.1903	1.0093	2.8162
62	07:00:00	1.1466	1.2579	2.7351
63	07:30:00	1.7746	1.0358	1.5894
64	08:00:00	1.4126	0.56663	1.2681
65	08:30:00	0.92625	0.29165	1.7247
66	09:00:00	0.46645	0.16601	1.7972
67	09:30:00	0.30115	0.009	0.86774
68	10:00:00	0.1976	0	0.62435
69	10:30:00	0.152	0.05486	0.51739
70	11:00:00	0.23095	0	0.31792
71	11:30:00	0.30083	0	0.22223
72	12:00:00	0	0	0.11153
73	12:30:00	0.12635	0	0.21283
74	13:00:00	0.33345	0	1.0779
75	13:30:00	0.36955	0.08473	0.66941
76	14:00:00	0.35245	0	0.94936
77	14:30:00	0.35815	0.04592	1.6764
78	15:00:00	0.2337	0	2.4858
79	15:30:00	0.31445	0.01357	1.4927
80	16:00:00	0.4864	0	2.3433

81	16:30:00	0.47405	0.08748	2.4753
82	17:00:00	0.53485	0	3.2027
83	17:30:00	0.665	0.2706	2.9251
84	18:00:00	0.63365	0.00867	2.9659
85	18:30:00	0.6346	0.29218	2.9261
86	19:00:00	0.73625	0.15945	4.2912
87	19:30:00	0.70585	0.52852	4.2267
88	20:00:00	0.8018	0.3322	3.9787
89	20:30:00	0.78375	0.75974	8.0229
90	21:00:00	0.9082	0.61334	9.1211
91	21:30:00	1.2958	0.55969	9.1308
92	22:00:00	1.0963	0.38069	7.8286
93	22:30:00	0.8778	1.2324	4.4598
94	23:00:00	2.052	2.1296	3.4949
95	23:30:00	2.6001	1.7251	3.2175
96	00:00:00	2.1156	0.80448	2.7516
97	00:30:00	1.2673	0	2.7414
98	01:00:00	0.8645	0	2.5416
99	01:30:00	0.671677	0.00277	1.8382
100	02:00:00	0.5605	0.28071	1.6521

Lampiran 2. Data awal konsentrasi polutan Nitrogen Dioksida (NO₂) dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7).

No	Jam	SUF 1 (Kebonsari)	SUF 6 (Wonorejo)	SUF 7 (Ketabang Kali)
1	00:30:00	57.22999954	33.65800095	19.10099983
2	01:00:00	58.49900055	37.56800079	24.43700027
3	01:30:00	54.70800018	37.02700043	27.90200043
4	02:00:00	45.65299988	37.2859993	27.90999985
5	02:30:00	53.87799835	32.52799988	20.65099907
6	03:00:00	42.44100189	33.05799866	13.04599953
7	03:30:00	24.6590004	32.22399902	11.22599983
8	04:00:00	22.95199966	17.16600037	8.379199982
9	04:30:00	18.70599937	12.70100021	8.45759964
10	05:00:00	23.32799911	13.45400047	6.559999943
11	05:30:00	19.31699944	13.3409996	6.945600033
12	06:00:00	21.27499962	12.21100044	8.592000008
13	06:30:00	17.13899994	11.3920002	8.337599754
14	07:00:00	16.37199974	12.62699986	8.236800194
15	07:30:00	15.76099968	13.93000031	8.027199745
16	08:00:00	11.81299973	13.52000046	10.28199959
17	08:30:00	16.74799919	12.44299984	18.72299957
18	09:00:00	25.44300079	11.91800022	21.58099937
19	09:30:00	33.10400009	13.12800026	18.9810009
20	10:00:00	25.58399963	12.39500046	19.18400002
21	10:30:00	22.43499947	14.32299995	20.80800056
22	11:00:00	14.52299976	12.03800011	15.06200027
23	11:30:00	14.5539999	4.851200104	17.51000023
24	12:00:00	22.3409996	3.006400108	14.98200035

25	12:30:00	25	2.489599943	12.56000042
26	13:00:00	0	2.559999943	17.65399933
27	13:30:00	38.85300064	9.257599831	15.27400017
28	14:00:00	39.55799866	11.51000023	31.22100067
29	14:30:00	20.25699997	1.737599969	28.79000092
30	15:00:00	11.84399986	1.167999983	37.74100113
31	15:30:00	14.35099983	1.664000034	26.37599945
32	16:00:00	21.33799934	2.552900076	0
33	16:30:00	18.23600006	0	28.59399986
34	17:00:00	13.64599991	16.37299919	29.27700043
35	17:30:00	36.72299957	16.83799934	35.56200027
36	18:00:00	38.33599854	11.41100025	35.2879982
37	18:30:00	31.77199936	7.998400211	34.99499893
38	19:00:00	28.05900002	13.2130003	32.20000076
39	19:30:00	32.16400146	12.76799965	37.45100021
40	20:00:00	26.57099915	18.86100006	33.63999939
41	20:30:00	26.80599976	21.49300003	27.93899918
42	21:00:00	35.75099945	25.48999977	34.30099869
43	21:30:00	10.05799961	0.832000017	37.61299896
44	22:00:00	18.94099998	1.164800048	20.00600052
45	22:30:00	50.11800003	5.761600018	21.95400047
46	23:00:00	34.43500137	14.00199986	31.5340004
47	23:30:00	39.98099899	9.844799995	40.45399857
48	00:00:00	25.77199936	1.971199989	36.82699966
49	00:30:00	13.55200005	1.748800039	30.23500061
50	01:00:00	18.61199951	4.036799908	34.59999847
51	01:30:00	18.58099937	6.804800034	44.51399994
52	02:00:00	18.8939991	9.90719986	32.09000015
53	02:30:00	23.625	8.859199524	29.75699997

54	03:00:00	26.50799942	9.390399933	23.47699928
55	03:30:00	30.20499992	6.753600121	17.77799988
56	04:00:00	31.8029995	6.639999866	17.14999962
57	04:30:00	30.69099998	8.897600174	19.09600067
58	05:00:00	31.50600052	10.36200047	21.71699905
59	05:30:00	28.99900055	13.60499954	21.47999954
60	06:00:00	32.41400146	13.77299976	19.93000031
61	06:30:00	35.8769989	17.47999954	23.01099968
62	07:00:00	36.42499924	23.95499992	25.35499954
63	07:30:00	53.40800095	25.66200066	31.36800003
64	08:00:00	55.80500031	19.12000084	37.93099976
65	08:30:00	44.90100098	8.902400017	41.10200119
66	09:00:00	22.62299919	3.382400036	36.66400146
67	09:30:00	15.63500023	1.590399981	33.5019989
68	10:00:00	8.303299904	0	22.61100006
69	10:30:00	6.110000134	0.934400022	22.54700089
70	11:00:00	7.536200047	0.558399975	19.94199944
71	11:30:00	8.945699692	0.099200003	27.6989994
72	12:00:00	6.96449995	0	26.20499992
73	12:30:00	0	0.148800001	19.18199921
74	13:00:00	16.04299927	0	22.17000008
75	13:30:00	22.30900002	0	20.14999962
76	14:00:00	18.09499931	0	30.11000061
77	14:30:00	18.20499992	0	44.94900131
78	15:00:00	11.875	2.521600008	45.34700012
79	15:30:00	17.26499939	4.727600098	47.52000046
80	16:00:00	23.53100014	3.592099905	0
81	16:30:00	27.62000084	0.854399979	52.24499893
82	17:00:00	24.45599937	1.06400001	48.02799988

83	17:30:00	34.92100143	5.244800091	48.9980011
84	18:00:00	33.95000076	5.76639986	46.97299957
85	18:30:00	32.74300003	6.828800201	47.11999893
86	19:00:00	40.12200165	9.161600113	46.79999924
87	19:30:00	37.39599991	15.69799995	45.33300018
88	20:00:00	43.47499847	10.23999977	44.78099823
89	20:30:00	43.17699814	12.31700039	40.4659996
90	21:00:00	51.44900131	9.713600159	38.44200134
91	21:30:00	60.04999924	7.09280014	34.9469986
92	22:00:00	53.17300034	16.8029995	29.32799911
93	22:30:00	36.22100067	21.62899971	37.14899826
94	23:00:00	53.6269989	41.89300156	39.13600159
95	23:30:00	57.43399811	41.11999893	40.54700089
96	00:00:00	54.80199814	25.19199944	38.2879982
97	00:30:00	55.38199997	2.428800106	36.49900055
98	01:00:00	57.57500076	0.774399996	35.62400055
99	01:30:00	43.7879982	5.460800171	32.85800171
100	02:00:00	36.39400101	13.51000023	30.53100014

Lampiran 3. Perbandingan hasil estimasi konsentrasi polutan Karbon monoksida (CO) dengan data real (data pengukuran) dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter* pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7).

No	Pukul	Data Real SUF 1 (Kebonsari)	Hasil Estimasi SUF 1 (Kebonsari)	Error UKF
1	00:30:00	1.1875	1.1605	0.0270
2	01:00:00	1.4288	1.4266	0.0022
3	01:30:00	1.1761	1.1753	0.0008
4	02:00:00	0.66785	0.6678	0.0001
5	02:30:00	0.513	0.5125	0.0005
6	03:00:00	0.5016	0.5009	0.0007
7	03:30:00	0.4218	0.4213	0.0005
8	04:00:00	0.32585	0.3254	0.0005
9	04:30:00	0.31255	0.3120	0.0006
10	05:00:00	0.37525	0.3746	0.0006
11	05:30:00	0.2926	0.2922	0.0004
12	06:00:00	0.30115	0.3007	0.0005
13	06:30:00	0.3344	0.3339	0.0005
14	07:00:00	0.32585	0.3254	0.0004
15	07:30:00	0.3382	0.3378	0.0004
16	08:00:00	0.3363	0.3359	0.0004
17	08:30:00	0.323	0.3226	0.0004
18	09:00:00	0.5111	0.5104	0.0007
19	09:30:00	0.90725	0.9062	0.0010
20	10:00:00	0.71345	0.7133	0.0002
21	10:30:00	0.76475	0.7642	0.0006

22	11:00:00	0.47595	0.4759	0.0001
23	11:30:00	0.47595	0.4755	0.0005
24	12:00:00	0.3496	0.3493	0.0003
25	12:30:00	0	0.0001	0.0001
26	13:00:00	0.2774	0.2766	0.0008
27	13:30:00	0.1805	0.1803	0.0002
28	14:00:00	0.2755	0.2750	0.0005
29	14:30:00	0.25555	0.2552	0.0003
30	15:00:00	0.59565	0.5948	0.0008
31	15:30:00	0.30115	0.3012	0.0001
32	16:00:00	0.33915	0.3387	0.0004
33	16:30:00	0.3173	0.3169	0.0004
34	17:00:00	0.2736	0.2733	0.0003
35	17:30:00	0.52915	0.5284	0.0008
36	18:00:00	0.50255	0.5022	0.0004
37	18:30:00	0.4085	0.4082	0.0003
38	19:00:00	0.4313	0.4308	0.0005
39	19:30:00	0.6346	0.6339	0.0007
40	20:00:00	0.46265	0.4625	0.0002
41	20:30:00	0.4826	0.4821	0.0005
42	21:00:00	0.6745	0.6737	0.0008
43	21:30:00	0.24035	0.2406	0.0002
44	22:00:00	0.171	0.1707	0.0003
45	22:30:00	0.456	0.4552	0.0008
46	23:00:00	0.5073	0.5068	0.0005
47	23:30:00	0.84455	0.8436	0.0010
48	00:00:00	0.5054	0.5054	0.0000
49	00:30:00	0.2451	0.2450	0.0001
50	01:00:00	0.3439	0.3433	0.0006

51	01:30:00	0.34485	0.3444	0.0004
52	02:00:00	0.35435	0.3539	0.0004
53	02:30:00	0.51965	0.5190	0.0007
54	03:00:00	0.5776	0.5771	0.0005
55	03:30:00	0.66215	0.6616	0.0006
56	04:00:00	0.70015	0.6996	0.0005
57	04:30:00	0.64885	0.6484	0.0004
58	05:00:00	0.58425	0.5838	0.0004
59	05:30:00	0.5757	0.5752	0.0005
60	06:00:00	0.86925	0.8683	0.0010
61	06:30:00	1.1903	1.1893	0.0010
62	07:00:00	1.1466	1.1460	0.0006
63	07:30:00	1.7746	1.7729	0.0017
64	08:00:00	1.4126	1.4124	0.0002
65	08:30:00	0.92625	0.9262	0.0000
66	09:00:00	0.46645	0.4665	0.0000
67	09:30:00	0.30115	0.3008	0.0003
68	10:00:00	0.1976	0.1973	0.0003
69	10:30:00	0.152	0.1516	0.0004
70	11:00:00	0.23095	0.2304	0.0005
71	11:30:00	0.30083	0.3003	0.0005
72	12:00:00	0	0.0001	0.0001
73	12:30:00	0.12635	0.1258	0.0005
74	13:00:00	0.33345	0.3328	0.0006
75	13:30:00	0.36955	0.3692	0.0004
76	14:00:00	0.35245	0.3521	0.0003
77	14:30:00	0.35815	0.3578	0.0004
78	15:00:00	0.2337	0.2335	0.0002
79	15:30:00	0.31445	0.3140	0.0005

80	16:00:00	0.4864	0.4858	0.0006
81	16:30:00	0.47405	0.4737	0.0004
82	17:00:00	0.53485	0.5344	0.0005
83	17:30:00	0.665	0.6644	0.0006
84	18:00:00	0.63365	0.6333	0.0004
85	18:30:00	0.6346	0.6341	0.0005
86	19:00:00	0.73625	0.7356	0.0006
87	19:30:00	0.70585	0.7054	0.0004
88	20:00:00	0.8018	0.8012	0.0006
89	20:30:00	0.78375	0.7833	0.0004
90	21:00:00	0.9082	0.9075	0.0007
91	21:30:00	1.2958	1.2947	0.0011
92	22:00:00	1.0963	1.0960	0.0003
93	22:30:00	0.8778	0.8775	0.0003
94	23:00:00	2.052	2.0495	0.0025
95	23:30:00	2.6001	2.5984	0.0017
96	00:00:00	2.1156	2.1153	0.0003
97	00:30:00	1.2673	1.2676	0.0003
98	01:00:00	0.8645	0.8642	0.0003
99	01:30:00	0.671677	0.6712	0.0005
100	02:00:00	0.5605	0.5600	0.0005

No	Pukul	Data Real SUF 6 (Wonorejo)	Hasil Estimasi SUF 6 (Wonorejo)	Error UKF
1	00:30:00	1.8669	1.7514	0.1155
2	01:00:00	2.129	2.1194	0.0096
3	01:30:00	2.0389	2.0314	0.0075
4	02:00:00	2.7425	2.7337	0.0088
5	02:30:00	2.6268	2.6202	0.0066
6	03:00:00	2.3408	2.3352	0.0056
7	03:30:00	1.5588	1.5544	0.0044
8	04:00:00	0.50585	0.5022	0.0036
9	04:30:00	0.44483	0.4402	0.0046
10	05:00:00	0.46791	0.4633	0.0046
11	05:30:00	0.50335	0.4989	0.0044
12	06:00:00	0.47984	0.4757	0.0041
13	06:30:00	0.56541	0.5611	0.0043
14	07:00:00	0.6072	0.6031	0.0041
15	07:30:00	0.56024	0.5563	0.0039
16	08:00:00	0.52654	0.5223	0.0043
17	08:30:00	0.48457	0.4808	0.0037
18	09:00:00	0.49877	0.4946	0.0041
19	09:30:00	0.56456	0.5604	0.0041
20	10:00:00	0.33305	0.3295	0.0035
21	10:30:00	0.24167	0.2379	0.0038
22	11:00:00	0.26092	0.2569	0.0040
23	11:30:00	0.22799	0.2242	0.0038
24	12:00:00	0.09607	0.0925	0.0036
25	12:30:00	0.21812	0.2141	0.0040
26	13:00:00	0.29786	0.2940	0.0039

27	13:30:00	0.02795	0.0245	0.0034
28	14:00:00	0.33054	0.3263	0.0042
29	14:30:00	0.17562	0.1719	0.0037
30	15:00:00	0.09494	0.0952	0.0003
31	15:30:00	0.27063	0.2636	0.0070
32	16:00:00	0.12578	0.1223	0.0034
33	16:30:00	0.36554	0.3614	0.0041
34	17:00:00	0.4718	0.4680	0.0038
35	17:30:00	0	0.0029	0.0029
36	18:00:00	0.52888	0.5242	0.0047
37	18:30:00	0.18721	0.1843	0.0029
38	19:00:00	0.47146	0.4672	0.0043
39	19:30:00	0.4799	0.4764	0.0035
40	20:00:00	0.74975	0.7456	0.0041
41	20:30:00	0.93783	0.9339	0.0039
42	21:00:00	1.1296	1.1254	0.0042
43	21:30:00	0	0.0020	0.0020
44	22:00:00	0	0.0045	0.0045
45	22:30:00	0.1015	0.0975	0.0040
46	23:00:00	0.36754	0.3637	0.0038
47	23:30:00	0.33434	0.3307	0.0036
48	00:00:00	0.00155	0.0018	0.0003
49	00:30:00	0	0.0040	0.0040
50	01:00:00	0	0.0038	0.0038
51	01:30:00	0.12555	0.1219	0.0037
52	02:00:00	0.2821	0.2782	0.0039
53	02:30:00	0.34524	0.3413	0.0039
54	03:00:00	0.36358	0.3597	0.0039
55	03:30:00	0.30163	0.2978	0.0038

56	04:00:00	0.22782	0.2241	0.0037
57	04:30:00	0.27109	0.2672	0.0039
58	05:00:00	0.29688	0.2932	0.0036
59	05:30:00	0.50187	0.4985	0.0034
60	06:00:00	0.79298	0.7890	0.0040
61	06:30:00	1.0093	1.0058	0.0035
62	07:00:00	1.2579	1.2538	0.0041
63	07:30:00	1.0358	1.0316	0.0042
64	08:00:00	0.56663	0.5634	0.0033
65	08:30:00	0.29165	0.2887	0.0030
66	09:00:00	0.16601	0.1627	0.0033
67	09:30:00	0.009	0.0051	0.0039
68	10:00:00	0	0.0036	0.0036
69	10:30:00	0.05486	0.0512	0.0036
70	11:00:00	0	0.0036	0.0036
71	11:30:00	0	0.0037	0.0037
72	12:00:00	0	0.0038	0.0038
73	12:30:00	0	0.0037	0.0037
74	13:00:00	0	0.0032	0.0032
75	13:30:00	0.08473	0.0805	0.0042
76	14:00:00	0	0.0034	0.0034
77	14:30:00	0.04592	0.0427	0.0033
78	15:00:00	0	0.0029	0.0029
79	15:30:00	0.01357	0.0094	0.0042
80	16:00:00	0	0.0028	0.0028
81	16:30:00	0.08748	0.0841	0.0034
82	17:00:00	0	0.0027	0.0027
83	17:30:00	0.2706	0.2667	0.0039
84	18:00:00	0.00867	0.0059	0.0028

85	18:30:00	0.29218	0.2885	0.0037
86	19:00:00	0.15945	0.1575	0.0020
87	19:30:00	0.52852	0.5248	0.0037
88	20:00:00	0.3322	0.3293	0.0029
89	20:30:00	0.75974	0.7590	0.0008
90	21:00:00	0.61334	0.6117	0.0016
91	21:30:00	0.55969	0.5575	0.0022
92	22:00:00	0.38069	0.3779	0.0028
93	22:30:00	1.2324	1.2264	0.0060
94	23:00:00	2.1296	2.1246	0.0050
95	23:30:00	1.7251	1.7222	0.0029
96	00:00:00	0.80448	0.8021	0.0023
97	00:30:00	0	0.0021	0.0021
98	01:00:00	0	0.0034	0.0034
99	01:30:00	0.00277	0.0008	0.0019
100	02:00:00	0.28071	0.2770	0.0037

No	Pukul	Data Real SUF 7 (Ketabang Kali)	Hasil Estimasi SUF 7 (Ketabang Kali)	Error UKF
1	00:30:00	0.7665	0.8101	0.0436
2	01:00:00	0.72343	0.7265	0.0031
3	01:30:00	1.1901	1.1923	0.0022
4	02:00:00	0.7048	0.7096	0.0048
5	02:30:00	0.51146	0.5161	0.0046
6	03:00:00	0.58982	0.5941	0.0043
7	03:30:00	0.55302	0.5572	0.0041
8	04:00:00	0.31515	0.3192	0.0040
9	04:30:00	0.33476	0.3385	0.0037
10	05:00:00	0.28814	0.2922	0.0040
11	05:30:00	0.32203	0.3261	0.0040
12	06:00:00	0.47863	0.4825	0.0039
13	06:30:00	0.56226	0.5663	0.0041
14	07:00:00	0.72916	0.7331	0.0039
15	07:30:00	0.8875	0.8913	0.0038
16	08:00:00	0.55211	0.5568	0.0047
17	08:30:00	0.88507	0.8885	0.0035
18	09:00:00	0.735	0.7393	0.0043
19	09:30:00	0.70835	0.7125	0.0041
20	10:00:00	0.76972	0.7735	0.0038
21	10:30:00	0.72291	0.7268	0.0039
22	11:00:00	0.52713	0.5313	0.0042
23	11:30:00	0.44748	0.4515	0.0040
24	12:00:00	0.35644	0.3605	0.0040
25	12:30:00	0.2104	0.2147	0.0043

26	13:00:00	0.27215	0.2762	0.0040
27	13:30:00	0.20498	0.2090	0.0041
28	14:00:00	0.29153	0.2956	0.0041
29	14:30:00	0.17151	0.1758	0.0043
30	15:00:00	5.6467	5.6399	0.0068
31	15:30:00	0.9297	0.9406	0.0109
32	16:00:00	0.75834	0.7622	0.0038
33	16:30:00	0.67309	0.6771	0.0040
34	17:00:00	0.84984	0.8535	0.0037
35	17:30:00	0.92951	0.9329	0.0034
36	18:00:00	0.80557	0.8098	0.0042
37	18:30:00	1.2669	1.2697	0.0028
38	19:00:00	1.1183	1.1223	0.0040
39	19:30:00	1.4873	1.4903	0.0030
40	20:00:00	1.5583	1.5620	0.0037
41	20:30:00	1.7741	1.7775	0.0034
42	21:00:00	1.6607	1.6648	0.0041
43	21:30:00	1.6891	1.6921	0.0030
44	22:00:00	0.54234	0.5477	0.0053
45	22:30:00	0.35838	0.3624	0.0040
46	23:00:00	0.8546	0.8576	0.0030
47	23:30:00	1.0133	1.0168	0.0035
48	00:00:00	0.7933	0.7972	0.0039
49	00:30:00	0.41857	0.4229	0.0043
50	01:00:00	0.26887	0.2730	0.0041
51	01:30:00	0.61172	0.6150	0.0033
52	02:00:00	0.77104	0.7747	0.0036
53	02:30:00	0.67922	0.6833	0.0041
54	03:00:00	0.61941	0.6235	0.0041

55	03:30:00	0.53114	0.5353	0.0042
56	04:00:00	0.55597	0.5599	0.0039
57	04:30:00	0.5986	0.6025	0.0039
58	05:00:00	0.89964	0.9030	0.0034
59	05:30:00	1.8993	1.9013	0.0020
60	06:00:00	2.0976	2.1009	0.0033
61	06:30:00	2.8162	2.8185	0.0023
62	07:00:00	2.7351	2.7387	0.0036
63	07:30:00	1.5894	1.5949	0.0055
64	08:00:00	1.2681	1.2722	0.0041
65	08:30:00	1.7247	1.7272	0.0025
66	09:00:00	1.7972	1.8001	0.0029
67	09:30:00	0.86774	0.8725	0.0047
68	10:00:00	0.62435	0.6282	0.0038
69	10:30:00	0.51739	0.5212	0.0038
70	11:00:00	0.31792	0.3220	0.0040
71	11:30:00	0.22223	0.2262	0.0040
72	12:00:00	0.11153	0.1156	0.0041
73	12:30:00	0.21283	0.2166	0.0038
74	13:00:00	1.0779	1.0802	0.0023
75	13:30:00	0.66941	0.6739	0.0045
76	14:00:00	0.94936	0.9526	0.0032
77	14:30:00	1.6764	1.6786	0.0022
78	15:00:00	2.4858	2.4875	0.0017
79	15:30:00	1.4927	1.4975	0.0048
80	16:00:00	2.3433	2.3449	0.0016
81	16:30:00	2.4753	2.4780	0.0027
82	17:00:00	3.2027	3.2040	0.0013
83	17:30:00	2.9251	2.9282	0.0031

84	18:00:00	2.9659	2.9683	0.0024
85	18:30:00	2.9261	2.9288	0.0027
86	19:00:00	4.2912	4.2910	0.0002
87	19:30:00	4.2267	4.2290	0.0023
88	20:00:00	3.9787	3.9811	0.0024
89	20:30:00	8.0229	8.0172	0.0057
90	21:00:00	9.1211	9.1191	0.0020
91	21:30:00	9.1308	9.1302	0.0006
92	22:00:00	7.8286	7.8303	0.0017
93	22:30:00	4.4598	4.4667	0.0069
94	23:00:00	3.4949	3.4993	0.0044
95	23:30:00	3.2175	3.2208	0.0033
96	00:00:00	2.7516	2.7549	0.0033
97	00:30:00	2.7414	2.7434	0.0020
98	01:00:00	2.5416	2.5440	0.0024
99	01:30:00	1.8382	1.8417	0.0035
100	02:00:00	1.6521	1.6552	0.0031

Lampiran 4. Perbandingan hasil estimasi konsentrasi polutan Nitrogen Dioksida (NO₂) dengan data real (data pengukuran) dengan menggunakan metode *Unscented Kalman Filter* pada daerah Kebonsari (SUF 1), Wonorejo (SUF 6), Ketabang Kali (SUF 7).

No	Pukul	Data Real SUF 1 (Kebonsari)	Hasil Estimasi SUF 1 (Kebonsari)	Error UKF
1	00:30:00	57.22999954	56.8429	0.3871
2	01:00:00	58.49900055	58.4621	0.0369
3	01:30:00	54.70800018	54.6848	0.0232
4	02:00:00	45.65299988	45.6421	0.0109
5	02:30:00	53.87799835	53.8424	0.0356
6	03:00:00	42.44100189	42.4367	0.0043
7	03:30:00	24.6590004	24.6672	0.0082
8	04:00:00	22.95199966	22.939	0.0130
9	04:30:00	18.70599937	18.6995	0.0065
10	05:00:00	23.32799911	23.3096	0.0184
11	05:30:00	19.31699944	19.3128	0.0042
12	06:00:00	21.27499962	21.2624	0.0126
13	06:30:00	17.13899994	17.1364	0.0026
14	07:00:00	16.37199974	16.365	0.0070
15	07:30:00	15.76099968	15.7544	0.0066
16	08:00:00	11.81299973	11.8122	0.0008
17	08:30:00	16.74799919	16.7342	0.0138
18	09:00:00	25.44300079	25.4229	0.0201
19	09:30:00	33.10400009	33.0837	0.0203
20	10:00:00	25.58399963	25.5856	0.0016
21	10:30:00	22.43499947	22.4299	0.0051

22	11:00:00	14.52299976	14.526	0.0030
23	11:30:00	14.5539999	14.5462	0.0078
24	12:00:00	22.3409996	22.3217	0.0193
25	12:30:00	25	24.9879	0.0121
26	13:00:00	0	0.0312	0.0312
27	13:30:00	38.85300064	38.7866	0.0664
28	14:00:00	39.55799866	39.5471	0.0109
29	14:30:00	20.25699997	20.2757	0.0187
30	15:00:00	11.84399986	11.8476	0.0036
31	15:30:00	14.35099983	14.3395	0.0115
32	16:00:00	21.33799934	21.3199	0.0181
33	16:30:00	18.23600006	18.2336	0.0024
34	17:00:00	13.64599991	13.646	0.0000
35	17:30:00	36.72299957	36.6799	0.0431
36	18:00:00	38.33599854	38.3233	0.0127
37	18:30:00	31.77199936	31.7703	0.0017
38	19:00:00	28.05900002	28.0526	0.0064
39	19:30:00	32.16400146	32.1458	0.0182
40	20:00:00	26.57099915	26.5675	0.0035
41	20:30:00	26.80599976	26.794	0.0120
42	21:00:00	35.75099945	35.7254	0.0256
43	21:30:00	10.05799961	10.0865	0.0285
44	22:00:00	18.94099998	18.9184	0.0226
45	22:30:00	50.11800003	50.0601	0.0579
46	23:00:00	34.43500137	34.4462	0.0112
47	23:30:00	39.98099899	39.9589	0.0221
48	00:00:00	25.77199936	25.7803	0.0083
49	00:30:00	13.55200005	13.5591	0.0071
50	01:00:00	18.61199951	18.5949	0.0171

51	01:30:00	18.58099937	18.5727	0.0083
52	02:00:00	18.8939991	18.8855	0.0085
53	02:30:00	23.625	23.6097	0.0153
54	03:00:00	26.50799942	26.4949	0.0131
55	03:30:00	30.20499992	30.1897	0.0153
56	04:00:00	31.8029995	31.7899	0.0131
57	04:30:00	30.69099998	30.6813	0.0097
58	05:00:00	31.50600052	31.493	0.0130
59	05:30:00	28.99900055	28.9908	0.0082
60	06:00:00	32.41400146	32.3966	0.0174
61	06:30:00	35.8769989	35.859	0.0180
62	07:00:00	36.42499924	36.4106	0.0144
63	07:30:00	53.40800095	53.3669	0.0411
64	08:00:00	55.80500031	55.7838	0.0212
65	08:30:00	44.90100098	44.899	0.0020
66	09:00:00	22.62299919	22.6399	0.0169
67	09:30:00	15.63500023	15.632	0.0030
68	10:00:00	8.303299904	8.3042	0.0009
69	10:30:00	6.110000134	6.106	0.0040
70	11:00:00	7.536200047	7.5287	0.0075
71	11:30:00	8.945699692	8.9393	0.0064
72	12:00:00	6.96449995	6.9639	0.0006
73	12:30:00	0	0.008	0.0080
74	13:00:00	16.04299927	16.016	0.0270
75	13:30:00	22.30900002	22.2954	0.0136
76	14:00:00	18.09499931	18.0961	0.0011
77	14:30:00	18.20499992	18.1991	0.0059
78	15:00:00	11.875	11.879	0.0040
79	15:30:00	17.26499939	17.2513	0.0137

80	16:00:00	23.53100014	23.5148	0.0162
81	16:30:00	27.62000084	27.6065	0.0135
82	17:00:00	24.45599937	24.4525	0.0035
83	17:30:00	34.92100143	34.8956	0.0254
84	18:00:00	33.95000076	33.9406	0.0094
85	18:30:00	32.74300003	32.733	0.0100
86	19:00:00	40.12200165	40.098	0.0240
87	19:30:00	37.39599991	37.3863	0.0097
88	20:00:00	43.47499847	43.4511	0.0239
89	20:30:00	43.17699814	43.1617	0.0153
90	21:00:00	51.44900131	51.4195	0.0295
91	21:30:00	60.04999924	60.018	0.0320
92	22:00:00	53.17300034	53.1628	0.0102
93	22:30:00	36.22100067	36.2268	0.0058
94	23:00:00	53.6269989	53.5808	0.0462
95	23:30:00	57.43399811	57.4075	0.0265
96	00:00:00	54.80199814	54.7845	0.0175
97	00:30:00	55.38199997	55.3595	0.0225
98	01:00:00	57.57500076	57.5496	0.0254
99	01:30:00	43.7879982	43.7874	0.0006
100	02:00:00	36.39400101	36.3854	0.0086

No	Pukul	Data Real SUF 6 (Wonorejo)	Hasil Estimasi SUF 6 (Wonorejo)	Error UKF
1	00:30:00	33.65800095	33.321	0.3370
2	01:00:00	37.56800079	37.5357	0.0323
3	01:30:00	37.02700043	37.0059	0.0211
4	02:00:00	37.2859993	37.2661	0.0199
5	02:30:00	32.52799988	32.5163	0.0117
6	03:00:00	33.05799866	33.041	0.0170
7	03:30:00	32.22399902	32.2148	0.0092
8	04:00:00	17.16600037	17.1814	0.0154
9	04:30:00	12.70100021	12.7042	0.0032
10	05:00:00	13.45400047	13.4482	0.0058
11	05:30:00	13.3409996	13.3375	0.0035
12	06:00:00	12.21100044	12.2089	0.0021
13	06:30:00	11.3920002	11.3875	0.0045
14	07:00:00	12.62699986	12.6188	0.0082
15	07:30:00	13.93000031	13.9212	0.0088
16	08:00:00	13.52000046	13.5156	0.0044
17	08:30:00	12.44299984	12.4444	0.0014
18	09:00:00	11.91800022	11.9157	0.0023
19	09:30:00	13.12800026	13.1196	0.0084
20	10:00:00	12.39500046	12.3918	0.0032
21	10:30:00	14.32299995	14.317	0.0060
22	11:00:00	12.03800011	12.0345	0.0035
23	11:30:00	4.851200104	4.8628	0.0116
24	12:00:00	3.006400108	3.0079	0.0015
25	12:30:00	2.489599943	2.4899	0.0003
26	13:00:00	2.559999943	2.565	0.0050

27	13:30:00	9.257599831	9.2458	0.0118
28	14:00:00	11.51000023	11.5176	0.0076
29	14:30:00	1.737599969	1.7522	0.0146
30	15:00:00	1.167999983	1.1779	0.0099
31	15:30:00	1.664000034	1.6603	0.0037
32	16:00:00	2.552900076	2.5379	0.0150
33	16:30:00	0	0.028	0.0280
34	17:00:00	16.37299919	16.3507	0.0223
35	17:30:00	16.83799934	16.8427	0.0047
36	18:00:00	11.41100025	11.4199	0.0089
37	18:30:00	7.998400211	8.0043	0.0059
38	19:00:00	13.2130003	13.2038	0.0092
39	19:30:00	12.76799965	12.774	0.0060
40	20:00:00	18.86100006	18.8508	0.0102
41	20:30:00	21.49300003	21.4861	0.0069
42	21:00:00	25.48999977	25.4879	0.0021
43	21:30:00	0.832000017	0.875	0.0430
44	22:00:00	1.164800048	1.1557	0.0091
45	22:30:00	5.761600018	5.7593	0.0023
46	23:00:00	14.00199986	13.9982	0.0038
47	23:30:00	9.844799995	9.8593	0.0145
48	00:00:00	1.971199989	1.9848	0.0136
49	00:30:00	1.748800039	1.7504	0.0016
50	01:00:00	4.036799908	4.0434	0.0066
51	01:30:00	6.804800034	6.8155	0.0107
52	02:00:00	9.90719986	9.9012	0.0060
53	02:30:00	8.859199524	8.8648	0.0056
54	03:00:00	9.390399933	9.3885	0.0019
55	03:30:00	6.753600121	6.7552	0.0016

56	04:00:00	6.639999866	6.6399	0.0001
57	04:30:00	8.897600174	8.895	0.0026
58	05:00:00	10.36200047	10.3612	0.0008
59	05:30:00	13.60499954	13.5996	0.0054
60	06:00:00	13.77299976	13.7715	0.0015
61	06:30:00	17.47999954	17.4758	0.0042
62	07:00:00	23.95499992	23.9449	0.0101
63	07:30:00	25.66200066	25.6606	0.0014
64	08:00:00	19.12000084	19.1324	0.0124
65	08:30:00	8.902400017	8.9207	0.0183
66	09:00:00	3.382400036	3.3918	0.0094
67	09:30:00	1.590399981	1.5983	0.0079
68	10:00:00	0	0.0046	0.0046
69	10:30:00	0.934400022	0.9428	0.0084
70	11:00:00	0.558399975	0.5659	0.0075
71	11:30:00	0.099200003	0.1123	0.0131
72	12:00:00	0	0.0044	0.0044
73	12:30:00	0.148800001	0.1472	0.0016
74	13:00:00	0	0.0041	0.0041
75	13:30:00	0	0.0004	0.0004
76	14:00:00	0	0.0078	0.0078
77	14:30:00	0	0.0126	0.0126
78	15:00:00	2.521600008	2.5225	0.0009
79	15:30:00	4.727600098	4.7319	0.0043
80	16:00:00	3.592099905	3.5664	0.0257
81	16:30:00	0.854399979	0.8999	0.0455
82	17:00:00	1.06400001	1.0677	0.0037
83	17:30:00	5.244800091	5.2467	0.0019
84	18:00:00	5.76639986	5.7725	0.0061

85	18:30:00	6.828800201	6.8355	0.0067
86	19:00:00	9.161600113	9.1659	0.0043
87	19:30:00	15.69799995	15.6942	0.0038
88	20:00:00	10.23999977	10.2553	0.0153
89	20:30:00	12.31700039	12.3176	0.0006
90	21:00:00	9.713600159	9.7229	0.0093
91	21:30:00	7.09280014	7.1012	0.0084
92	22:00:00	16.8029995	16.7895	0.0135
93	22:30:00	21.62899971	21.6313	0.0023
94	23:00:00	41.89300156	41.8642	0.0288
95	23:30:00	41.11999893	41.1215	0.0015
96	00:00:00	25.19199944	25.2142	0.0222
97	00:30:00	2.428800106	2.4649	0.0361
98	01:00:00	0.774399996	0.7815	0.0071
99	01:30:00	5.460800171	5.459	0.0018
100	02:00:00	13.51000023	13.5036	0.0064

No	Pukul	Data Real SUF 7 (Ketabang Kali)	Hasil Estimasi SUF 7 (Ketabang Kali)	Error UKF
1	00:30:00	19.10099983	19.2592	0.1582
2	01:00:00	24.43700027	24.4443	0.0073
3	01:30:00	27.90200043	27.9066	0.0046
4	02:00:00	27.90999985	27.9173	0.0073
5	02:30:00	20.65099907	20.6674	0.0164
6	03:00:00	13.04599953	13.066	0.0200
7	03:30:00	11.22599983	11.237	0.0110
8	04:00:00	8.379199982	8.3824	0.0032
9	04:30:00	8.45759964	8.4538	0.0038
10	05:00:00	6.559999943	6.5613	0.0013
11	05:30:00	6.945600033	6.9439	0.0017
12	06:00:00	8.592000008	8.5879	0.0041
13	06:30:00	8.337599754	8.3368	0.0008
14	07:00:00	8.236800194	8.2373	0.0005
15	07:30:00	8.027199745	8.0292	0.0020
16	08:00:00	10.28199959	10.2792	0.0028
17	08:30:00	18.72299957	18.7064	0.0166
18	09:00:00	21.58099937	21.5712	0.0098
19	09:30:00	18.9810009	18.9816	0.0006
20	10:00:00	19.18400002	19.1796	0.0044
21	10:30:00	20.80800056	20.8023	0.0057
22	11:00:00	15.06200027	15.0682	0.0062
23	11:30:00	17.51000023	17.4972	0.0128
24	12:00:00	14.98200035	14.977	0.0050
25	12:30:00	12.56000042	12.5558	0.0042

26	13:00:00	17.65399933	17.6364	0.0176
27	13:30:00	15.27400017	15.2747	0.0007
28	14:00:00	31.22100067	31.1881	0.0329
29	14:30:00	28.79000092	28.7789	0.0111
30	15:00:00	37.74100113	37.7078	0.0332
31	15:30:00	26.37599945	26.3782	0.0022
32	16:00:00	0	0.0372	0.0372
33	16:30:00	28.59399986	28.5334	0.0606
34	17:00:00	29.27700043	29.2717	0.0053
35	17:30:00	35.56200027	35.5447	0.0173
36	18:00:00	35.2879982	35.2766	0.0114
37	18:30:00	34.99499893	34.9809	0.0141
38	19:00:00	32.20000076	32.1943	0.0057
39	19:30:00	37.45100021	37.4294	0.0216
40	20:00:00	33.63999939	33.6377	0.0023
41	20:30:00	27.93899918	27.9434	0.0044
42	21:00:00	34.30099869	34.287	0.0140
43	21:30:00	37.61299896	37.5835	0.0295
44	22:00:00	20.00600052	20.0173	0.0113
45	22:30:00	21.95400047	21.9381	0.0159
46	23:00:00	31.5340004	31.5088	0.0252
47	23:30:00	40.45399857	40.4233	0.0307
48	00:00:00	36.82699966	36.8111	0.0159
49	00:30:00	30.23500061	30.226	0.0090
50	01:00:00	34.59999847	34.5737	0.0263
51	01:30:00	44.51399994	44.4767	0.0373
52	02:00:00	32.09000015	32.0947	0.0047
53	02:30:00	29.75699997	29.7469	0.0101
54	03:00:00	23.47699928	23.477	0.0000

55	03:30:00	17.77799988	17.7784	0.0004
56	04:00:00	17.14999962	17.1435	0.0065
57	04:30:00	19.09600067	19.0866	0.0094
58	05:00:00	21.71699905	21.7064	0.0106
59	05:30:00	21.47999954	21.4759	0.0041
60	06:00:00	19.93000031	19.9284	0.0016
61	06:30:00	23.01099968	23.0036	0.0074
62	07:00:00	25.35499954	25.3522	0.0028
63	07:30:00	31.36800003	31.3578	0.0102
64	08:00:00	37.93099976	37.9118	0.0192
65	08:30:00	41.10200119	41.0784	0.0236
66	09:00:00	36.66400146	36.649	0.0150
67	09:30:00	33.5019989	33.4842	0.0178
68	10:00:00	22.61100006	22.6084	0.0026
69	10:30:00	22.54700089	22.5292	0.0178
70	11:00:00	19.94199944	19.9303	0.0117
71	11:30:00	27.6989994	27.669	0.0300
72	12:00:00	26.20499992	26.1908	0.0142
73	12:30:00	19.18199921	19.18	0.0020
74	13:00:00	22.17000008	22.152	0.0180
75	13:30:00	20.14999962	20.1411	0.0089
76	14:00:00	30.11000061	30.0786	0.0314
77	14:30:00	44.94900131	44.9033	0.0457
78	15:00:00	45.34700012	45.324	0.0230
79	15:30:00	47.52000046	47.4938	0.0262
80	16:00:00	0	0.0697	0.0697
81	16:30:00	52.24499893	52.1378	0.1072
82	17:00:00	48.02799988	48.0097	0.0183
83	17:30:00	48.9980011	48.9733	0.0247

84	18:00:00	46.97299957	46.9533	0.0197
85	18:30:00	47.11999893	47.0973	0.0227
86	19:00:00	46.79999924	46.7796	0.0204
87	19:30:00	45.33300018	45.3192	0.0138
88	20:00:00	44.78099823	44.7615	0.0195
89	20:30:00	40.4659996	40.4556	0.0104
90	21:00:00	38.44200134	38.4267	0.0153
91	21:30:00	34.9469986	34.9337	0.0133
92	22:00:00	29.32799911	29.3276	0.0004
93	22:30:00	37.14899826	37.1277	0.0213
94	23:00:00	39.13600159	39.1374	0.0014
95	23:30:00	40.54700089	40.5466	0.0004
96	00:00:00	38.2879982	38.2821	0.0059
97	00:30:00	36.49900055	36.4764	0.0226
98	01:00:00	35.62400055	35.5995	0.0245
99	01:30:00	32.85800171	32.8406	0.0174
100	02:00:00	30.53100014	30.52	0.0110

Lampiran 5. Source Code mengecek keteramatan model pencemaran udara.

```
clc
clear all
%Cek Keteramatan Model Pencemaran Udara

%Parameter model
Dx=36;%koefisien difusi arah x dengan(satuan =
km2/jam)
Dy=36;%koefisien difusi arah y dengan(satuan =
km2/jam)
dx=2; %(satuan = km)
dy=2; %(satuan = km)
Ux=20; %kecepatan aliran udara arah x (satuan =
km/jam)
Uy=20; %kecepatan aliran udara arah y (satuan =
km/jam)
dt=0.01; %(satuan = jam)
q=0.01;
r=0.00001;
Q=q*eye(100);
R=r*eye(3);
P=eye(100)*0.0001;
n=10;

a=((Dx/(dx^2))-(Ux/2*dx))*dt;
b(((1/dt)-(2*Dx)/(dx^2))-(2*Dy/(dy^2)))*dt;
c=((Dx/(dx^2))+(Ux/(2*dx)))*dt;
d((Dy/(dy^2))-(Ux/(2*dy)))*dt;
e((Dy/(dy^2))+(Ux/2*dy))*dt;

%Ukuran matriks keadaan
s=n^2;

%Bentuk matriks A
%Matriks A
f=zeros(s,s);
```

```

for i=1:s
    f(i,i)=b;
end
for i=1:s-1
    f(i+1,i)=e;
    f(i,i+1)=d;
    f(10,11)=0;
    f(20,21)=0;
    f(30,31)=0;
    f(40,41)=0;
    f(50,51)=0;
    f(60,61)=0;
    f(70,71)=0;
    f(80,81)=0;
    f(90,91)=0;
end
for i=1:s-10
    f(i,i+10)=a;
    f(i+10,i)=c;
end

%Matriks koefisien pengukuran
H = zeros(3,s);
H(1,42) = 1;
H(2,55) = 1;
H(3,56) = 1;

%Cek Observable
H0=H;
W0=H;
H1=H0*f;
for W=1:99
    W=[W0;H1*f];
    W0=W;
    H0=H1;
end
range = rank(W)

```

Lampiran 6. Source Code fungsi program *Unscented Kalman Filter*

```
function [x,P]=ukf(f,x,P,h,z,Q,R)
%Hitung jumlah elemen dari nilai state dan nilai
observasi(nilai pengukuran )
L = numel(x);
m = numel(z);

%Tentukan nilai konstanta alpha, beta, dan ki
alpha = 0.001; %1e-3;
beta = 2;
ki = 0;

%Hitung nilai lambda dan c untuk digunakan
sebagai faktor skala
lambda = alpha^2*(L+ki)-L;
c = L+lambda;

%Hitung bobot rata-rata dan bobot kovarians
Wm = [lambda/c 0.5/c+zeros(1,2*L)];
Wc = Wm;
Wc(1) = Wc(1)+(1-alpha^2+beta);

%Lakukan proses perhitungan sigma poin disekitar
nilai state
c = sqrt(c);
X = sigmaPoin(x,P,c);

%Lakukan proses transformasi Unscented pada
state
[x1,X1,P1,X2] = ut(f,X,Wm,Wc,L,Q);

%Lakukan proses transformasi Unscented pada data
observasi(data pengukuran)
[z1,Z1,P2,Z2] = ut(h,X1,Wm,Wc,m,R);
```

```
%Hitung nilai Kovarians cross menggunakan data
hasil transformasi pada perhitungan sebelumnya
P12 = X2*diag(Wc)*Z2';
```

```
%Hitung faktor gain Kalman
R = chol(P2);
K = (P12/R)/R';
%K=P12*inv(P2);
```

```
%Hitung nilai akhir dari Estimasi Vektor State
dan Kovarians Estimasi Vektor State
x = x1+K*(z-z1);
P = P1-K*P12';
```

```
%Gunakan fungsi ini untuk mendapatkan sigma poin
disekitar nilai state yang sedang dihitung
function X = sigmaPoin(x,P,c)
```

```
%Inputs:
% x: nilai state yang akan dicari sigmanya
% P: kovarians estimasi vektor state
% c: faktor skala
%Output:
% X: Sigma poin
```

```
A = c*chol(P)';
Y = x(:,ones(1,numel(x)));
X = [x Y+A Y-A];
```

```
%Gunakan fungsi ini untuk melakukan transformasi
Unscented
function [y,Y,P,Y1] = ut(f,X,Wm,Wc,n,R)
```

```
%Input:
% f: fungsi non-linear
% X: sigma poin
% Wm: bobot rata-rata
% Wc: bobot kovarians
```

```

% n: jumlah elemen dalam fungsi
% R: kovarians noise
%Output:
% y: transformasi rata-rata
% Y: transformasi poin sampling
% P: transformasi kovarians
% Y1: transformasi deviasi

L=size(X,2);
y=zeros(n,1);
Y=zeros(n,L);
for k=1:L
    Y(:,k)=f(X(:,k));
    y=y+Wm(k)*Y(:,k);
end
Y1=Y-y(:,ones(1,L));
P=Y1*diag(Wc)*Y1'+R;

```


“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 7. *Source Code* estimasi konsentrasi polutan CO menggunakan *Unscented Kalman Filter* dengan data pengukuran

```
close all
clear all;
clc;

%data awal polutan CO
dataCO=[1.1875 1.428799987 1.176100016
0.667850018 0.513000011 0.501600027 0.421799988
0.32585001 0.312550008 0.375250012 0.292600006
0.301149994 0.334399998 0.32585001 0.338200003
0.336299986 0.323000014 0.511099994 0.907249987
0.713450015 0.764750004 0.475950003 0.475950003
0.349599987 0 0.277399987 0.180500001
0.2755 0.255549997 0.595650017 0.301149994
0.339150012 0.317299992 0.273600012 0.529150009
0.502550006 0.408499986 0.431300014 0.634599984
0.462650001 0.482600003 0.674499989 0.240349993
0.171000004 0.456 0.507300019 0.844550014
0.505400002 0.245100006 0.343899995 0.344850004
0.354350001 0.519649982 0.577600002 0.662150025
0.700150013 0.648850024 0.584249973 0.575699985
0.86925 1.190299988 1.146600008 1.774600029
1.41260004 0.926249981 0.466450006 0.301149994
0.197600007 0.151999995 0.230949998 0.300830007
0 0.126350001 0.33344999 0.36954999
0.352450013 0.358150005 0.233700007 0.314449996
0.486400008 0.474049985 0.534850001 0.665000021
0.633650005 0.634599984 0.736249983 0.705850005
0.801800013 0.783749998 0.908200026 1.295799971
1.096300006 0.877799988 2.052000046 2.60010004
2.115600109 1.26730001 0.864499986 0.671676576
0.560500026; ...
1.866899967 2.128999949 2.038899899
2.742500067 2.62680006 2.340800047 1.558799982
0.505850017 0.44483 0.467909992 0.503350019
0.47984001 0.565410018 0.607200027 0.560239971
0.526539981 0.484569997 0.498769999 0.564559996
```

0.333050013	0.241669998	0.260919988	0.227990001
0.096069999	0.218119994	0.297859997	0.02795
0.330540001	0.175620005	0.094939999	0.270630002
0.125780001	0.365539998	0.471799999	0
0.52888	0.187209994	0.471460015	0.479900002
0.749750018	0.937829971	1.129600048	0
0	0.101499997	0.367540002	0.334340006
0.00155	0	0	0.125550002
0.282099992	0.345239997	0.363579988	0.30162999
0.227819994	0.271090001	0.296880007	0.501869977
0.792980015	1.009299994	1.2579	1.03579998
0.566630006	0.291649997	0.166010007	0.009
0	0.05486	0	0
0	0	0	0.084729999
0	0.045919999	0	0.01357
0	0.087480001	0	0.270599991
0.00867	0.292180002	0.159449995	0.528519988
0.332199991	0.759739995	0.61334002	0.559689999
0.380690008	1.23239994	2.129600048	1.72510004
0.80448001600		0	0.00277
0.280710012;	...		
	0.766499996	0.723429978	1.190099955
0.70480001	0.511460006	0.589820027	0.55302
0.315149993	0.33476001	0.288139999	0.322030008
0.478630006	0.562259972	0.729160011	0.887499988
0.552110016	0.885070026	0.735000014	0.708350003
0.769720018	0.722909987	0.527130008	0.447479993
0.356440008	0.2104	0.27215001	0.204980001
0.291530013	0.171509996	5.646699905	0.929700017
0.758340001	0.673089981	0.849839985	0.929509997
0.805570006	1.266899943	1.118299961	1.487300038
1.558300018	1.774099946	1.660699964	1.689100027
0.542339981	0.35837999	0.854600012	1.013299942
0.793299973	0.418570012	0.268869996	0.611720026
0.771040022	0.679220021	0.619409978	0.531140029
0.555970013	0.59859997	0.899640024	1.899299979
2.097599983	2.816200018	2.735100031	1.589400053
1.268100023	1.724699974	1.797199965	0.867739975
0.624350011	0.517390013	0.317919999	0.222230002
0.111529998	0.212830007	1.077900052	0.66940999

```

0.949360013 1.676399946 2.485800028 1.492699981
2.343300104 2.475300074 3.2026999 2.925100088
2.965899944 2.926100016 4.291200161 4.226699829
3.978699923 8.022899628 9.121100426 9.130800247
7.82859993 4.459799767 3.494899988 3.217499971
2.751600027 2.741400003 2.541599989 1.838199973
1.652099967];

```

```
T=length(dataCO);
```

```
%Pendefisian Nilai Parameter
```

```

n=100; %jumlah state
m=3; %jumlah titik ukur
Dx=36; %koefisien difusi arah x
dengan(satuan = km2/jam)
Dy=36; %koefisien difusi arah y
dengan(satuan = km2/jam)
dx=2; %(satuan = km)
dy=2; %(satuan = km)
Ux=20; %kecepatan aliran udara arah x
(satuan = km/jam)
Uy=20; %kecepatan aliran udara arah y
(satuan = km/jam)
dt=0.01;% (satuan = jam)
q=0.01;
r=0.00001;
P=eye(n)*0.001;
Q=q*eye(n);
R=r*eye(m);
Wk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi state
Vk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi pengukuran

```

```
%Pemisalan dari model sistem
```

```

a=((Dx/(dx^2))-(Ux/2*dx))*dt;
b(((1/dt)-(2*Dx)/(dx^2)-(2*Dy/(dy^2))))*dt;
c=((Dx/(dx^2))+(Ux/(2*dx)))*dt;
d=((Dy/(dy^2))-(Uy/(2*dy)))*dt;
e=((Dy/(dy^2))+(Uy/2*dy))*dt;

```

```

% Pendefinisian Fungsi State Estimasi
f=@(x) [(a*x(11)+b*x(1)+d*x(2));
(a*x(12)+b*x(2)+d*x(3)+e*x(1));
(a*x(13)+b*x(3)+d*x(4)+e*x(2));
(a*x(14)+b*x(4)+d*x(5)+e*x(3));
(a*x(15)+b*x(5)+d*x(6)+e*x(4));
(a*x(16)+b*x(6)+d*x(7)+e*x(5));
(a*x(17)+b*x(7)+d*x(8)+e*x(6));
(a*x(18)+b*x(8)+d*x(9)+e*x(7));
(a*x(19)+b*x(9)+d*x(10)+e*x(8));
(a*x(20)+b*x(10)+e*x(9));
(a*x(21)+b*x(11)+c*x(1)+d*x(12));
(a*x(22)+b*x(12)+c*x(2)+d*x(13)+e*x(11));
(a*x(23)+b*x(13)+c*x(3)+d*x(14)+e*x(12));
(a*x(24)+b*x(14)+c*x(4)+d*x(15)+e*x(13));
(a*x(25)+b*x(15)+c*x(5)+d*x(16)+e*x(14));
(a*x(26)+b*x(16)+c*x(6)+d*x(17)+e*x(15));
(a*x(27)+b*x(17)+c*x(7)+d*x(18)+e*x(16));
(a*x(28)+b*x(18)+c*x(8)+d*x(19)+e*x(17));
(a*x(29)+b*x(19)+c*x(9)+d*x(20)+e*x(18));
(a*x(30)+b*x(20)+c*x(10)+e*x(19));
(a*x(31)+b*x(21)+c*x(11)+d*x(22));
(a*x(32)+b*x(22)+c*x(12)+d*x(23)+e*x(21));
(a*x(33)+b*x(23)+c*x(13)+d*x(24)+e*x(22));
(a*x(34)+b*x(24)+c*x(14)+d*x(25)+e*x(23));
(a*x(35)+b*x(25)+c*x(15)+d*x(26)+e*x(24));
(a*x(36)+b*x(26)+c*x(16)+d*x(27)+e*x(25));
(a*x(37)+b*x(27)+c*x(17)+d*x(28)+e*x(26));
(a*x(38)+b*x(28)+c*x(18)+d*x(29)+e*x(27));
(a*x(39)+b*x(29)+c*x(19)+d*x(30)+e*x(28));
(a*x(40)+b*x(30)+c*x(20)+e*x(29));
(a*x(41)+b*x(31)+c*x(21)+d*x(32));
(a*x(42)+b*x(32)+c*x(22)+d*x(33)+e*x(31));
(a*x(43)+b*x(33)+c*x(23)+d*x(34)+e*x(32));
(a*x(44)+b*x(34)+c*x(24)+d*x(35)+e*x(33));
(a*x(45)+b*x(35)+c*x(25)+d*x(36)+e*x(34));
(a*x(46)+b*x(36)+c*x(26)+d*x(37)+e*x(35));
(a*x(47)+b*x(37)+c*x(27)+d*x(38)+e*x(36));
(a*x(48)+b*x(38)+c*x(28)+d*x(39)+e*x(37));
(a*x(49)+b*x(39)+c*x(29)+d*x(40)+e*x(38));

```

$(a^*x(50)+b^*x(40)+c^*x(30)+e^*x(39))$;
 $(a^*x(51)+b^*x(41)+c^*x(31)+d^*x(42))$;
 $(a^*x(52)+b^*x(42)+c^*x(32)+d^*x(43)+e^*x(41))$;
 $(a^*x(53)+b^*x(43)+c^*x(33)+d^*x(44)+e^*x(42))$;
 $(a^*x(54)+b^*x(44)+c^*x(34)+d^*x(45)+e^*x(43))$;
 $(a^*x(55)+b^*x(45)+c^*x(35)+d^*x(46)+e^*x(44))$;
 $(a^*x(56)+b^*x(46)+c^*x(36)+d^*x(47)+e^*x(45))$;
 $(a^*x(57)+b^*x(47)+c^*x(37)+d^*x(48)+e^*x(46))$;
 $(a^*x(58)+b^*x(48)+c^*x(38)+d^*x(49)+e^*x(47))$;
 $(a^*x(59)+b^*x(49)+c^*x(39)+d^*x(50)+e^*x(48))$;
 $(a^*x(60)+b^*x(50)+c^*x(40)+e^*x(49))$;
 $(a^*x(61)+b^*x(51)+c^*x(41)+d^*x(52))$;
 $(a^*x(62)+b^*x(52)+c^*x(42)+d^*x(53)+e^*x(51))$;
 $(a^*x(63)+b^*x(53)+c^*x(43)+d^*x(54)+e^*x(52))$;
 $(a^*x(64)+b^*x(54)+c^*x(44)+d^*x(55)+e^*x(53))$;
 $(a^*x(65)+b^*x(55)+c^*x(45)+d^*x(56)+e^*x(54))$;
 $(a^*x(66)+b^*x(56)+c^*x(46)+d^*x(57)+e^*x(55))$;
 $(a^*x(67)+b^*x(57)+c^*x(47)+d^*x(58)+e^*x(56))$;
 $(a^*x(68)+b^*x(58)+c^*x(48)+d^*x(59)+e^*x(57))$;
 $(a^*x(69)+b^*x(59)+c^*x(49)+d^*x(60)+e^*x(58))$;
 $(a^*x(70)+b^*x(60)+c^*x(50)+e^*x(59))$;
 $(a^*x(71)+b^*x(61)+c^*x(51)+d^*x(62))$;
 $(a^*x(72)+b^*x(62)+c^*x(52)+d^*x(63)+e^*x(61))$;
 $(a^*x(73)+b^*x(63)+c^*x(53)+d^*x(64)+e^*x(62))$;
 $(a^*x(74)+b^*x(64)+c^*x(54)+d^*x(65)+e^*x(63))$;
 $(a^*x(75)+b^*x(65)+c^*x(55)+d^*x(66)+e^*x(64))$;
 $(a^*x(76)+b^*x(66)+c^*x(56)+d^*x(67)+e^*x(65))$;
 $(a^*x(77)+b^*x(67)+c^*x(57)+d^*x(68)+e^*x(66))$;
 $(a^*x(78)+b^*x(68)+c^*x(58)+d^*x(69)+e^*x(67))$;
 $(a^*x(79)+b^*x(69)+c^*x(59)+d^*x(70)+e^*x(68))$;
 $(a^*x(80)+b^*x(70)+c^*x(60)+e^*x(69))$;
 $(a^*x(81)+b^*x(71)+c^*x(61)+d^*x(72))$;
 $(a^*x(82)+b^*x(72)+c^*x(62)+d^*x(73)+e^*x(71))$;
 $(a^*x(83)+b^*x(73)+c^*x(63)+d^*x(74)+e^*x(72))$;
 $(a^*x(84)+b^*x(74)+c^*x(64)+d^*x(75)+e^*x(73))$;
 $(a^*x(85)+b^*x(75)+c^*x(65)+d^*x(76)+e^*x(74))$;
 $(a^*x(86)+b^*x(76)+c^*x(66)+d^*x(77)+e^*x(75))$;
 $(a^*x(87)+b^*x(77)+c^*x(67)+d^*x(78)+e^*x(76))$;
 $(a^*x(88)+b^*x(78)+c^*x(68)+d^*x(79)+e^*x(77))$;
 $(a^*x(89)+b^*x(79)+c^*x(69)+d^*x(80)+e^*x(78))$;

```

(a*x(90)+b*x(80)+c*x(70)+e*x(79));
(a*x(91)+b*x(81)+c*x(71)+d*x(82));
(a*x(92)+b*x(82)+c*x(72)+d*x(83)+e*x(81));
(a*x(93)+b*x(83)+c*x(73)+d*x(84)+e*x(82));
(a*x(94)+b*x(84)+c*x(74)+d*x(85)+e*x(83));
(a*x(95)+b*x(85)+c*x(75)+d*x(86)+e*x(84));
(a*x(96)+b*x(86)+c*x(76)+d*x(87)+e*x(85));
(a*x(97)+b*x(87)+c*x(77)+d*x(88)+e*x(86));
(a*x(98)+b*x(88)+c*x(78)+d*x(89)+e*x(87));
(a*x(99)+b*x(89)+c*x(79)+d*x(90)+e*x(88));
(a*x(100)+b*x(90)+c*x(80)+e*x(89));
(b*x(91)+c*x(81)+d*x(92));
(b*x(92)+c*x(82)+d*x(93)+e*x(91));
(b*x(93)+c*x(83)+d*x(94)+e*x(92));
(b*x(94)+c*x(84)+d*x(95)+e*x(93));
(b*x(95)+c*x(85)+d*x(96)+e*x(94));
(b*x(96)+c*x(86)+d*x(97)+e*x(95));
(b*x(97)+c*x(87)+d*x(98)+e*x(96));
(b*x(98)+c*x(88)+d*x(99)+e*x(97));
(b*x(99)+c*x(89)+d*x(100)+e*x(98));
(b*x(100)+c*x(90)+e*x(99)]+Wk;

```

```

% Pendefinisian Fungsi Pengukuran

```

```

h=@(x) [x(42); x(55); x(56)];

```

```

%Inisialisasi Nilai Awal State CO

```

```

xi = zeros(n,1);
xi(42)=1.1875;
xi(55)=1.8668999967;
xi(56)=0.7664999996;
x=xi+Vk;

```

```

%Membuat Penampung Untuk Hasil Estimasi dan
Pengukuran

```

```

xV=zeros(n,T);
zV=zeros(m,T);
tic

```

```

%Unsecented Kalman Filter
for k=1:T
    z = dataCO(:,k);
    zV(:,k)=z;
    [x,P]=ukf(f,x,P,h,z,Q,R);%Memanggil Function
UKF
    xV(:,k)=x;%Menyimpan Data Hasil Estimasi
end

```

```

%Grafik Hasil Estimasi UKF
figure(1)
plot(1:T,zV(1,:), '-*b', 1:T,abs(xV(42,:)), '-r', 'linewidth',1.5);
title('Estimasi Konsentrasi CO Daerah Kebonsari');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Data Real', 'Estimasi UKF');
grid on

```

```

figure(2)
plot(1:T,zV(2,:), '-*b', 1:T,abs(xV(55,:)), '-r', 'linewidth',1.5);
title('Estimasi Konsentrasi CO Daerah Wonorejo');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Data Real', 'Estimasi UKF');
grid on

```

```

figure(3)
plot(1:T,zV(3,:), '-*b', 1:T,abs(xV(56,:)), '-r', 'linewidth',1.5);
title('Estimasi Konsentrasi CO Daerah Ketabang Kali');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');

```



```

xlim([0 T])
legend('Data Real','Estimasi UKF');
grid on

%Grafik Error Hasil Estimasi UKF
figure(4)
errorUKF_COSUF1=abs(zV(1,:)-xV(42,:));
plot(errorUKF_COSUF1,'-*b')
xlabel('Waktu ke-')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada CO Daerah Kebonsari')
grid on

figure(5)
errorUKF_COSUF6=abs(zV(2,:)-xV(55,:));
plot(errorUKF_COSUF6,'-*r')
xlabel('Waktu ke-')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada CO Daerah Wonorejo')
grid on

figure(6)
errorUKF_COSUF7=abs(zV(3,:)-xV(56,:));
plot(errorUKF_COSUF7,'-*g')
xlabel('Waktu ke-')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada CO Daerah Ketabang Kali')
grid on

% Plot 3D Estimasi CO
figure(7)
plot(1:T,abs(xV(:,100)),'-*b','linewidth',1.5)
xlabel('Posisi')
ylabel('Nilai Konsentrasi CO')
title('Estimasi CO pada waktu ke-100')
legend('Hasil estimasi')
grid on;
hold on;

```

```

figure(8)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,100))  abs(xV(11:20,100))
abs(xV(21:30,100))      abs(xV(31:40,100))
abs(xV(41:50,100))      abs(xV(51:60,100))
abs(xV(61:70,100))      abs(xV(71:80,100))
abs(xV(81:90,100))      abs(xV(91:100,100))];
surf(X,Y,Z)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi CO')
title('Estimasi Polutan CO pada waktu ke 100 ')

```

```

figure(9)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,100))  abs(xV(11:20,100))
abs(xV(21:30,100))      abs(xV(31:40,100))
abs(xV(41:50,100))      abs(xV(51:60,100))
abs(xV(61:70,100))      abs(xV(71:80,100))
abs(xV(81:90,100))      abs(xV(91:100,100))];
contourf(X,Y,Z)
[C,h]=contourf(X,Y,Z);
clabel(C,h)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi CO')
title('Plot Kontur Penyebaran CO waktu ke 100 ')

```

```

figure(10)
plot(1:T,abs(xV(:,50)), '-*b', 'linewidth',1.5)
xlabel('Posisi')
ylabel('Nilai Konsentrasi CO')
title('Estimasi CO pada waktu ke-50')
legend('Hasil estimasi')
grid on;
hold on;

```

```

figure(11)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,50))    abs(xV(11:20,50))
     abs(xV(21:30,50))   abs(xV(31:40,50))
     abs(xV(41:50,50))   abs(xV(51:60,50))
     abs(xV(61:70,50))   abs(xV(71:80,50))
     abs(xV(81:90,50))   abs(xV(91:100,50))]
surf(X,Y,Z)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi CO')
title('Estimasi CO pada waktu ke-50')

```

```

figure(12)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,50))    abs(xV(11:20,50))
     abs(xV(21:30,50))   abs(xV(31:40,50))
     abs(xV(41:50,50))   abs(xV(51:60,50))
     abs(xV(61:70,50))   abs(xV(71:80,50))
     abs(xV(81:90,50))   abs(xV(91:100,50))]
contourf(X,Y,Z)
[C,h]=contourf(X,Y,Z);
clabel(C,h)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi CO')
title('Plot Kontur Penyebaran CO pada waktu ke-50')

```

```

figure(13)
plot(1:T,abs(xV(:,2)),'-*b','linewidth',1.5)
xlabel('Posisi')
ylabel('Nilai Konsentrasi CO')
title('Estimasi CO pada waktu ke-2')
legend('Hasil estimasi')
grid on;
hold on;

```

```

figure(14)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,2))    abs(xV(11:20,2))
abs(xV(21:30,2))      abs(xV(31:40,2))
abs(xV(41:50,2))      abs(xV(51:60,2))
abs(xV(61:70,2))      abs(xV(71:80,2))
abs(xV(81:90,2))      abs(xV(91:100,2))]
surf(X,Y,Z)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi CO')
title('Estimasi CO pada waktu ke-2')

figure(15)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,2))    abs(xV(11:20,2))
abs(xV(21:30,2))      abs(xV(31:40,2))
abs(xV(41:50,2))      abs(xV(51:60,2))
abs(xV(61:70,2))      abs(xV(71:80,2))
abs(xV(81:90,2))      abs(xV(91:100,2))]
contourf(X,Y,Z)
[C,h]=contourf(X,Y,Z);
clabel(C,h)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi CO')
title('Plot Kontur Penyebaran CO pada waktu ke-
2')
%Hasil Estimasi
disp([abs(xV(42,:))]);
disp([abs(xV(55,:))]);
disp([abs(xV(56,:))]);
%Nilai RMSE CO
RMSECO_SUF1=sqrt((sum((zV(1,:)-xV(42,:)).^2))/T)
RMSECO_SUF6=sqrt((sum((zV(2,:)-xV(55,:)).^2))/T)
RMSECO_SUF7=sqrt((sum((zV(3,:)-xV(56,:)).^2))/T)
toc

```

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 8. *Source Code* estimasi konsentrasi polutan NO₂ menggunakan *Unscented Kalman Filter* dengan data pengukuran

```
close all
clear all;
clc;

%data awal polutan NO2
dataNO2=[57.22999954 58.49900055 54.70800018
45.65299988 53.87799835 42.44100189 24.6590004
22.95199966 18.70599937 23.32799911 19.31699944
21.27499962 17.13899994 16.37199974 15.76099968
11.81299973 16.74799919 25.44300079 33.10400009
25.58399963 22.43499947 14.52299976 14.5539999
22.3409996 25 0 38.85300064
39.55799866 20.25699997 11.84399986 14.35099983
21.33799934 18.23600006 13.64599991 36.72299957
38.33599854 31.77199936 28.05900002 32.16400146
26.57099915 26.80599976 35.75099945 10.05799961
18.94099998 50.11800003 34.43500137 39.98099899
25.77199936 13.55200005 18.61199951 18.58099937
18.8939991 23.625 26.50799942 30.20499992
31.8029995 30.69099998 31.50600052 28.99900055
32.41400146 35.8769989 36.42499924 53.40800095
55.80500031 44.90100098 22.62299919 15.63500023
8.303299904 6.110000134 7.536200047 8.945699692
6.96449995 0 16.04299927 22.30900002
18.09499931 18.20499992 11.875 17.26499939
23.53100014 27.62000084 24.45599937 34.92100143
33.95000076 32.74300003 40.12200165 37.39599991
43.47499847 43.17699814 51.44900131 60.04999924
53.17300034 36.22100067 53.6269989 57.43399811
54.80199814 55.38199997 57.57500076 43.7879982
36.39400101; ...
33.65800095 37.56800079 37.02700043
37.2859993 32.52799988 33.05799866 32.22399902
17.16600037 12.70100021 13.45400047 13.3409996
12.21100044 11.3920002 12.62699986 13.93000031
```

13.52000046 12.44299984 11.91800022 13.12800026
12.39500046 14.32299995 12.03800011 4.851200104
3.006400108 2.489599943 2.559999943 9.257599831
11.51000023 1.737599969 1.167999983 1.664000034
2.552900076 0 16.37299919 16.83799934
11.41100025 7.998400211 13.2130003 12.76799965
18.86100006 21.49300003 25.48999977 0.832000017
1.164800048 5.761600018 14.00199986 9.844799995
1.971199989 1.748800039 4.036799908 6.804800034
9.90719986 8.859199524 9.390399933 6.753600121
6.639999866 8.897600174 10.36200047 13.60499954
13.77299976 17.47999954 23.95499992 25.66200066
19.12000084 8.902400017 3.382400036 1.590399981
0 0.934400022 0.558399975 0.099200003
0 0.148800001 0 0
0 0 2.521600008 4.727600098
3.592099905 0.854399979 1.06400001 5.244800091
5.76639986 6.828800201 9.161600113 15.69799995
10.23999977 12.31700039 9.713600159 7.09280014
16.8029995 21.62899971 41.89300156 41.11999893
25.19199944 2.428800106 0.774399996 5.460800171
13.51000023 ; ...
19.10099983 24.43700027 27.90200043
27.90999985 20.65099907 13.04599953 11.22599983
8.379199982 8.45759964 6.559999943 6.945600033
8.592000008 8.337599754 8.236800194 8.027199745
10.28199959 18.72299957 21.58099937 18.9810009
19.18400002 20.80800056 15.06200027 17.51000023
14.98200035 12.56000042 17.65399933 15.27400017
31.22100067 28.79000092 37.74100113 26.37599945
0 28.59399986 29.27700043 35.56200027
35.2879982 34.99499893 32.20000076 37.45100021
33.63999939 27.93899918 34.30099869 37.61299896
20.00600052 21.95400047 31.5340004 40.45399857
36.82699966 30.23500061 34.59999847 44.51399994
32.09000015 29.75699997 23.47699928 17.77799988
17.14999962 19.09600067 21.71699905 21.47999954
19.93000031 23.01099968 25.35499954 31.36800003
37.93099976 41.10200119 36.66400146 33.5019989
22.61100006 22.54700089 19.94199944 27.6989994

```

26.20499992 19.18199921 22.17000008 20.14999962
30.11000061 44.94900131 45.34700012 47.52000046
0          52.24499893 48.02799988 48.9980011
46.97299957 47.11999893 46.79999924 45.33300018
44.78099823 40.4659996 38.44200134 34.9469986
29.32799911 37.14899826 39.13600159 40.54700089
38.2879982 36.49900055 35.62400055 32.85800171
30.53100014];

```

```
T=length(dataNO2);
```

```
%Pendefisian Nilai Parameter
```

```

n=100;          %jumlah state
m=3;           %jumlah titik ukur
Dx=36;         %koefisien difusi arah x
                dengan(satuan = km2/jam)
Dy=36;         %koefisien difusi arah y
                dengan(satuan = km2/jam)
dx=2;          %(satuan = km)
dy=2;          %(satuan = km)
Ux=20;         %kecepatan aliran udara arah x
                (satuan = km/jam)
Uy=20;         %kecepatan aliran udara arah y
                (satuan = km/jam)
dt=0.01;       %(satuan = jam)
q=0.01;
r=0.00001;
P=eye(n)*0.001;
Q=q*eye(n);
R=r*eye(m);
Wk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi state
Vk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi pengukuran

```

```
%Pemisalan dari model sistem
```

```

a=((Dx/(dx^2))-(Ux/2*dx))*dt;
b(((1/dt)-(2*Dx)/(dx^2)-(2*Dy/(dy^2))))*dt;
c=((Dx/(dx^2))+(Ux/(2*dx)))*dt;
d=((Dy/(dy^2))-(Uy/(2*dy)))*dt;
e=((Dy/(dy^2))+(Uy/2*dy))*dt;

```



```
% Pendefinisian Fungsi State Estimasi
```

```
f=@(x) [(a*x(11)+b*x(1)+d*x(2));  
(a*x(12)+b*x(2)+d*x(3)+e*x(1));  
(a*x(13)+b*x(3)+d*x(4)+e*x(2));  
(a*x(14)+b*x(4)+d*x(5)+e*x(3));  
(a*x(15)+b*x(5)+d*x(6)+e*x(4));  
(a*x(16)+b*x(6)+d*x(7)+e*x(5));  
(a*x(17)+b*x(7)+d*x(8)+e*x(6));  
(a*x(18)+b*x(8)+d*x(9)+e*x(7));  
(a*x(19)+b*x(9)+d*x(10)+e*x(8));  
(a*x(20)+b*x(10)+e*x(9));  
(a*x(21)+b*x(11)+c*x(1)+d*x(12));  
(a*x(22)+b*x(12)+c*x(2)+d*x(13)+e*x(11));  
(a*x(23)+b*x(13)+c*x(3)+d*x(14)+e*x(12));  
(a*x(24)+b*x(14)+c*x(4)+d*x(15)+e*x(13));  
(a*x(25)+b*x(15)+c*x(5)+d*x(16)+e*x(14));  
(a*x(26)+b*x(16)+c*x(6)+d*x(17)+e*x(15));  
(a*x(27)+b*x(17)+c*x(7)+d*x(18)+e*x(16));  
(a*x(28)+b*x(18)+c*x(8)+d*x(19)+e*x(17));  
(a*x(29)+b*x(19)+c*x(9)+d*x(20)+e*x(18));  
(a*x(30)+b*x(20)+c*x(10)+e*x(19));  
(a*x(31)+b*x(21)+c*x(11)+d*x(22));  
(a*x(32)+b*x(22)+c*x(12)+d*x(23)+e*x(21));  
(a*x(33)+b*x(23)+c*x(13)+d*x(24)+e*x(22));  
(a*x(34)+b*x(24)+c*x(14)+d*x(25)+e*x(23));  
(a*x(35)+b*x(25)+c*x(15)+d*x(26)+e*x(24));  
(a*x(36)+b*x(26)+c*x(16)+d*x(27)+e*x(25));  
(a*x(37)+b*x(27)+c*x(17)+d*x(28)+e*x(26));  
(a*x(38)+b*x(28)+c*x(18)+d*x(29)+e*x(27));  
(a*x(39)+b*x(29)+c*x(19)+d*x(30)+e*x(28));  
(a*x(40)+b*x(30)+c*x(20)+e*x(29));  
(a*x(41)+b*x(31)+c*x(21)+d*x(32));  
(a*x(42)+b*x(32)+c*x(22)+d*x(33)+e*x(31));  
(a*x(43)+b*x(33)+c*x(23)+d*x(34)+e*x(32));  
(a*x(44)+b*x(34)+c*x(24)+d*x(35)+e*x(33));  
(a*x(45)+b*x(35)+c*x(25)+d*x(36)+e*x(34));  
(a*x(46)+b*x(36)+c*x(26)+d*x(37)+e*x(35));  
(a*x(47)+b*x(37)+c*x(27)+d*x(38)+e*x(36));  
(a*x(48)+b*x(38)+c*x(28)+d*x(39)+e*x(37));  
(a*x(49)+b*x(39)+c*x(29)+d*x(40)+e*x(38));
```

$(a^*x(50)+b^*x(40)+c^*x(30)+e^*x(39))$;
 $(a^*x(51)+b^*x(41)+c^*x(31)+d^*x(42))$;
 $(a^*x(52)+b^*x(42)+c^*x(32)+d^*x(43)+e^*x(41))$;
 $(a^*x(53)+b^*x(43)+c^*x(33)+d^*x(44)+e^*x(42))$;
 $(a^*x(54)+b^*x(44)+c^*x(34)+d^*x(45)+e^*x(43))$;
 $(a^*x(55)+b^*x(45)+c^*x(35)+d^*x(46)+e^*x(44))$;
 $(a^*x(56)+b^*x(46)+c^*x(36)+d^*x(47)+e^*x(45))$;
 $(a^*x(57)+b^*x(47)+c^*x(37)+d^*x(48)+e^*x(46))$;
 $(a^*x(58)+b^*x(48)+c^*x(38)+d^*x(49)+e^*x(47))$;
 $(a^*x(59)+b^*x(49)+c^*x(39)+d^*x(50)+e^*x(48))$;
 $(a^*x(60)+b^*x(50)+c^*x(40)+e^*x(49))$;
 $(a^*x(61)+b^*x(51)+c^*x(41)+d^*x(52))$;
 $(a^*x(62)+b^*x(52)+c^*x(42)+d^*x(53)+e^*x(51))$;
 $(a^*x(63)+b^*x(53)+c^*x(43)+d^*x(54)+e^*x(52))$;
 $(a^*x(64)+b^*x(54)+c^*x(44)+d^*x(55)+e^*x(53))$;
 $(a^*x(65)+b^*x(55)+c^*x(45)+d^*x(56)+e^*x(54))$;
 $(a^*x(66)+b^*x(56)+c^*x(46)+d^*x(57)+e^*x(55))$;
 $(a^*x(67)+b^*x(57)+c^*x(47)+d^*x(58)+e^*x(56))$;
 $(a^*x(68)+b^*x(58)+c^*x(48)+d^*x(59)+e^*x(57))$;
 $(a^*x(69)+b^*x(59)+c^*x(49)+d^*x(60)+e^*x(58))$;
 $(a^*x(70)+b^*x(60)+c^*x(50)+e^*x(59))$;
 $(a^*x(71)+b^*x(61)+c^*x(51)+d^*x(62))$;
 $(a^*x(72)+b^*x(62)+c^*x(52)+d^*x(63)+e^*x(61))$;
 $(a^*x(73)+b^*x(63)+c^*x(53)+d^*x(64)+e^*x(62))$;
 $(a^*x(74)+b^*x(64)+c^*x(54)+d^*x(65)+e^*x(63))$;
 $(a^*x(75)+b^*x(65)+c^*x(55)+d^*x(66)+e^*x(64))$;
 $(a^*x(76)+b^*x(66)+c^*x(56)+d^*x(67)+e^*x(65))$;
 $(a^*x(77)+b^*x(67)+c^*x(57)+d^*x(68)+e^*x(66))$;
 $(a^*x(78)+b^*x(68)+c^*x(58)+d^*x(69)+e^*x(67))$;
 $(a^*x(79)+b^*x(69)+c^*x(59)+d^*x(70)+e^*x(68))$;
 $(a^*x(80)+b^*x(70)+c^*x(60)+e^*x(69))$;
 $(a^*x(81)+b^*x(71)+c^*x(61)+d^*x(72))$;
 $(a^*x(82)+b^*x(72)+c^*x(62)+d^*x(73)+e^*x(71))$;
 $(a^*x(83)+b^*x(73)+c^*x(63)+d^*x(74)+e^*x(72))$;
 $(a^*x(84)+b^*x(74)+c^*x(64)+d^*x(75)+e^*x(73))$;
 $(a^*x(85)+b^*x(75)+c^*x(65)+d^*x(76)+e^*x(74))$;
 $(a^*x(86)+b^*x(76)+c^*x(66)+d^*x(77)+e^*x(75))$;
 $(a^*x(87)+b^*x(77)+c^*x(67)+d^*x(78)+e^*x(76))$;
 $(a^*x(88)+b^*x(78)+c^*x(68)+d^*x(79)+e^*x(77))$;
 $(a^*x(89)+b^*x(79)+c^*x(69)+d^*x(80)+e^*x(78))$;

```

(a*x(90)+b*x(80)+c*x(70)+e*x(79));
(a*x(91)+b*x(81)+c*x(71)+d*x(82));
(a*x(92)+b*x(82)+c*x(72)+d*x(83)+e*x(81));
(a*x(93)+b*x(83)+c*x(73)+d*x(84)+e*x(82));
(a*x(94)+b*x(84)+c*x(74)+d*x(85)+e*x(83));
(a*x(95)+b*x(85)+c*x(75)+d*x(86)+e*x(84));
(a*x(96)+b*x(86)+c*x(76)+d*x(87)+e*x(85));
(a*x(97)+b*x(87)+c*x(77)+d*x(88)+e*x(86));
(a*x(98)+b*x(88)+c*x(78)+d*x(89)+e*x(87));
(a*x(99)+b*x(89)+c*x(79)+d*x(90)+e*x(88));
(a*x(100)+b*x(90)+c*x(80)+e*x(89));
(b*x(91)+c*x(81)+d*x(92));
(b*x(92)+c*x(82)+d*x(93)+e*x(91));
(b*x(93)+c*x(83)+d*x(94)+e*x(92));
(b*x(94)+c*x(84)+d*x(95)+e*x(93));
(b*x(95)+c*x(85)+d*x(96)+e*x(94));
(b*x(96)+c*x(86)+d*x(97)+e*x(95));
(b*x(97)+c*x(87)+d*x(98)+e*x(96));
(b*x(98)+c*x(88)+d*x(99)+e*x(97));
(b*x(99)+c*x(89)+d*x(100)+e*x(98));
(b*x(100)+c*x(90)+e*x(99)]+Wk;

```

```

% Pendefinisian Fungsi Pengukuran

```

```

h=@(x) [x(42); x(55); x(56)];

```

```

%Inisialisasi Nilai Awal State CO

```

```

xi = zeros(n,1);
xi(42)=57.229999954;
xi(55)=33.658000095;
xi(56)=19.100999983;
x=xi+Vk;

```

```

%Membuat Penampung Untuk Hasil Estimasi dan
Pengukuran

```

```

xV=zeros(n,T);
zV=zeros(m,T);
tic

```

```

%Unsecented Kalman Filter
for k=1:T
    z = dataNO2(:,k);
    zV(:,k)=z;
    [x,P]=ukf(f,x,P,h,z,Q,R);%Memanggil Function
UKF
    xV(:,k)=x;%Menyimpan Data Hasil Estimasi
end

```

```

%Grafik Hasil Estimasi UKF
figure(1)
plot(1:T,zV(1,:), '-*b', 1:T,abs(xV(42,:)), '-r', 'linewidth',1.5);
title('Estimasi Konsentrasi NO2 Daerah Kebonsari');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Data Real', 'Estimasi UKF');
grid on

```

```

figure(2)
plot(1:T,zV(2,:), '-*b', 1:T,abs(xV(55,:)), '-r', 'linewidth',1.5);
title('Estimasi Konsentrasi NO2 Daerah Wonorejo');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Data Real', 'Estimasi UKF');
grid on

```

```

figure(3)
plot(1:T,zV(3,:), '-*b', 1:T,abs(xV(56,:)), '-r', 'linewidth',1.5);
title('Estimasi Konsentrasi NO2 Daerah Ketabang Kali');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');

```

```

xlim([0 T])
legend('Data Real','Estimasi UKF');
grid on

%Grafik Error Hasil Estimasi UKF
figure(4)
errorUKF_NO2SUF1=abs(zV(1,:)-xV(42,:));
plot(errorUKF_NO2SUF1,'-*b')
xlabel('Waktu ke-')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada NO2 Daerah Kebonsari')
grid on

figure(5)
errorUKF_NO2SUF6=abs(zV(2,:)-xV(55,:));
plot(errorUKF_NO2SUF6,'-*r')
xlabel('Waktu ke-')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada NO2 Daerah Wonorejo')
grid on

figure(6)
errorUKF_NO2SUF7=abs(zV(3,:)-xV(56,:));
plot(errorUKF_NO2SUF7,'-*g')
xlabel('Waktu ke-')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada NO2 Daerah Ketabang Kali')
grid on

% Plot 3D Estimasi NO2
figure(7)
plot(1:T,abs(xV(:,100)),'-*b','linewidth',1.5)
xlabel('Posisi')
ylabel('Nilai Konsentrasi NO2')
title('Estimasi NO2 pada waktu ke-100')
legend('Hasil estimasi')
grid on;
hold on;

```

```

figure(8)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,100))  abs(xV(11:20,100))
abs(xV(21:30,100))    abs(xV(31:40,100))
abs(xV(41:50,100))    abs(xV(51:60,100))
abs(xV(61:70,100))    abs(xV(71:80,100))
abs(xV(81:90,100))    abs(xV(91:100,100))];
surf(X,Y,Z)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi NO2')
title('Estimasi Polutan NO2 pada waktu ke 100 ')

```

```

figure(9)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,100))  abs(xV(11:20,100))
abs(xV(21:30,100))    abs(xV(31:40,100))
abs(xV(41:50,100))    abs(xV(51:60,100))
abs(xV(61:70,100))    abs(xV(71:80,100))
abs(xV(81:90,100))    abs(xV(91:100,100))];
contourf(X,Y,Z)
[C,h]=contourf(X,Y,Z);
clabel(C,h)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi NO2')
title('Plot Kontur Penyebaran NO2 pada waktu ke
100 ')

```

```

figure(10)
plot(1:T,abs(xV(:,50)), '-*b', 'linewidth',1.5)
xlabel('Posisi')
ylabel('Nilai Konsentrasi NO2')
title('Estimasi NO2 pada waktu ke-50')
legend('Hasil estimasi')
grid on;
hold on;

```

```

figure(11)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,50))    abs(xV(11:20,50))
     abs(xV(21:30,50))   abs(xV(31:40,50))
     abs(xV(41:50,50))   abs(xV(51:60,50))
     abs(xV(61:70,50))   abs(xV(71:80,50))
     abs(xV(81:90,50))   abs(xV(91:100,50))]
surf(X,Y,Z)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi NO2')
title('Estimasi NO2 pada waktu ke-50')

```

```

figure(12)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,50))    abs(xV(11:20,50))
     abs(xV(21:30,50))   abs(xV(31:40,50))
     abs(xV(41:50,50))   abs(xV(51:60,50))
     abs(xV(61:70,50))   abs(xV(71:80,50))
     abs(xV(81:90,50))   abs(xV(91:100,50))]
contourf(X,Y,Z)
[C,h]=contourf(X,Y,Z);
clabel(C,h)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi NO2')
title('Plot Kontur Penyebaran NO2 pada waktu ke-50')

```

```

figure(13)
plot(1:T,abs(xV(:,2)),'-*b','linewidth',1.5)
xlabel('Posisi')
ylabel('Nilai Konsentrasi NO2')
title('Estimasi NO2 pada waktu ke-2')
legend('Hasil estimasi')
grid on;
hold on;

```

```

figure(14)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z1 = [abs(xV(1:10,2))    abs(xV(11:20,2))
abs(xV(21:30,2))       abs(xV(31:40,2))
abs(xV(41:50,2))       abs(xV(51:60,2))
abs(xV(61:70,2))       abs(xV(71:80,2))
abs(xV(81:90,2))       abs(xV(91:100,2))]
surf(X,Y,Z)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi NO2')
title('Estimasi NO2 pada waktu ke-2')

figure(15)
[X,Y] = meshgrid(1:10,1:10);
Z = [abs(xV(1:10,2))    abs(xV(11:20,2))
abs(xV(21:30,2))       abs(xV(31:40,2))
abs(xV(41:50,2))       abs(xV(51:60,2))
abs(xV(61:70,2))       abs(xV(71:80,2))
abs(xV(81:90,2))       abs(xV(91:100,2))]
contourf(X,Y,Z)
[C,h]=contourf(X,Y,Z);
clabel(C,h)
colormap(jet)
xlabel('Posisi sb x')
ylabel('Posisi sb y')
zlabel('Konsentrasi NO2')
title('Plot Kontur Penyebaran NO2 pada waktu ke-
2')

% %Hasil Estimasi NO2
disp([abs(xV(42,:))]);
disp([abs(xV(55,:))]);
disp([abs(xV(56,:))]);

%Nilai RMSE NO2
RMSENO2_SUF1=sqrt((sum((zV(1,:)-
xV(42,:)).^2))/T)

```



```
RMSENO2_SUF6=sqrt((sum((zV(2,:)-  
xV(55,:)).^2))/T)  
RMSENO2_SUF7=sqrt((sum((zV(3,:)-  
xV(56,:)).^2))/T)  
toc
```

Lampiran 9. *Source Code* estimasi konsentrasi polutan CO menggunakan *Unscented Kalman Filter* dengan tanpa data pengukuran

```
close all
clear all;
clc;

%Pendefisian Nilai Parameter
n=100; %jumlah state
n=100; %jumlah state
m=3; %jumlah titik ukur
Dx=36;%koefisien difusi arah x dengan(satuan =
km2/jam)
Dy=36;%koefisien difusi arah y dengan(satuan =
km2/jam)
dx=2; %(satuan = km)
dy=2; %(satuan = km)
Ux=20; %kecepatan aliran udara arah x (satuan =
km/jam)
Uy=20; %kecepatan aliran udara arah y (satuan =
km/jam)
dt=0.01;%0.01; %(satuan = jam)
q=0.01;
r=0.00001;
P=eye(n)*0.001;
Q=q*eye(n);
R=r*eye(m);
Wk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi state
Vk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi pengukuran
T=100; %jumlah Iterasi

%Pemisalan dari model sistem
a=((Dx/(dx^2))-(Ux/2*dx))*dt;
b(((1/dt)-(2*Dx)/(dx^2))-(2*Dy/(dy^2)))*dt;
c=((Dx/(dx^2))+(Ux/(2*dx)))*dt;
d=((Dy/(dy^2))-(Uy/(2*dy)))*dt;
e=((Dy/(dy^2))+(Uy/2*dy))*dt;
```

```

% Pendefinisian Fungsi State Estimasi
f=@(x) [(a*x(11)+b*x(1)+d*x(2));
(a*x(12)+b*x(2)+d*x(3)+e*x(1));
(a*x(13)+b*x(3)+d*x(4)+e*x(2));
(a*x(14)+b*x(4)+d*x(5)+e*x(3));
(a*x(15)+b*x(5)+d*x(6)+e*x(4));
(a*x(16)+b*x(6)+d*x(7)+e*x(5));
(a*x(17)+b*x(7)+d*x(8)+e*x(6));
(a*x(18)+b*x(8)+d*x(9)+e*x(7));
(a*x(19)+b*x(9)+d*x(10)+e*x(8));
(a*x(20)+b*x(10)+e*x(9));
(a*x(21)+b*x(11)+c*x(1)+d*x(12));
(a*x(22)+b*x(12)+c*x(2)+d*x(13)+e*x(11));
(a*x(23)+b*x(13)+c*x(3)+d*x(14)+e*x(12));
(a*x(24)+b*x(14)+c*x(4)+d*x(15)+e*x(13));
(a*x(25)+b*x(15)+c*x(5)+d*x(16)+e*x(14));
(a*x(26)+b*x(16)+c*x(6)+d*x(17)+e*x(15));
(a*x(27)+b*x(17)+c*x(7)+d*x(18)+e*x(16));
(a*x(28)+b*x(18)+c*x(8)+d*x(19)+e*x(17));
(a*x(29)+b*x(19)+c*x(9)+d*x(20)+e*x(18));
(a*x(30)+b*x(20)+c*x(10)+e*x(19));
(a*x(31)+b*x(21)+c*x(11)+d*x(22));
(a*x(32)+b*x(22)+c*x(12)+d*x(23)+e*x(21));
(a*x(33)+b*x(23)+c*x(13)+d*x(24)+e*x(22));
(a*x(34)+b*x(24)+c*x(14)+d*x(25)+e*x(23));
(a*x(35)+b*x(25)+c*x(15)+d*x(26)+e*x(24));
(a*x(36)+b*x(26)+c*x(16)+d*x(27)+e*x(25));
(a*x(37)+b*x(27)+c*x(17)+d*x(28)+e*x(26));
(a*x(38)+b*x(28)+c*x(18)+d*x(29)+e*x(27));
(a*x(39)+b*x(29)+c*x(19)+d*x(30)+e*x(28));
(a*x(40)+b*x(30)+c*x(20)+e*x(29));
(a*x(41)+b*x(31)+c*x(21)+d*x(32));
(a*x(42)+b*x(32)+c*x(22)+d*x(33)+e*x(31));
(a*x(43)+b*x(33)+c*x(23)+d*x(34)+e*x(32));
(a*x(44)+b*x(34)+c*x(24)+d*x(35)+e*x(33));
(a*x(45)+b*x(35)+c*x(25)+d*x(36)+e*x(34));
(a*x(46)+b*x(36)+c*x(26)+d*x(37)+e*x(35));
(a*x(47)+b*x(37)+c*x(27)+d*x(38)+e*x(36));

```

(a*x(48)+b*x(38)+c*x(28)+d*x(39)+e*x(37));
(a*x(49)+b*x(39)+c*x(29)+d*x(40)+e*x(38));
(a*x(50)+b*x(40)+c*x(30)+e*x(39));
(a*x(51)+b*x(41)+c*x(31)+d*x(42));
(a*x(52)+b*x(42)+c*x(32)+d*x(43)+e*x(41));
(a*x(53)+b*x(43)+c*x(33)+d*x(44)+e*x(42));
(a*x(54)+b*x(44)+c*x(34)+d*x(45)+e*x(43));
(a*x(55)+b*x(45)+c*x(35)+d*x(46)+e*x(44));
(a*x(56)+b*x(46)+c*x(36)+d*x(47)+e*x(45));
(a*x(57)+b*x(47)+c*x(37)+d*x(48)+e*x(46));
(a*x(58)+b*x(48)+c*x(38)+d*x(49)+e*x(47));
(a*x(59)+b*x(49)+c*x(39)+d*x(50)+e*x(48));
(a*x(60)+b*x(50)+c*x(40)+e*x(49));
(a*x(61)+b*x(51)+c*x(41)+d*x(52));
(a*x(62)+b*x(52)+c*x(42)+d*x(53)+e*x(51));
(a*x(63)+b*x(53)+c*x(43)+d*x(54)+e*x(52));
(a*x(64)+b*x(54)+c*x(44)+d*x(55)+e*x(53));
(a*x(65)+b*x(55)+c*x(45)+d*x(56)+e*x(54));
(a*x(66)+b*x(56)+c*x(46)+d*x(57)+e*x(55));
(a*x(67)+b*x(57)+c*x(47)+d*x(58)+e*x(56));
(a*x(68)+b*x(58)+c*x(48)+d*x(59)+e*x(57));
(a*x(69)+b*x(59)+c*x(49)+d*x(60)+e*x(58));
(a*x(70)+b*x(60)+c*x(50)+e*x(59));
(a*x(71)+b*x(61)+c*x(51)+d*x(62));
(a*x(72)+b*x(62)+c*x(52)+d*x(63)+e*x(61));
(a*x(73)+b*x(63)+c*x(53)+d*x(64)+e*x(62));
(a*x(74)+b*x(64)+c*x(54)+d*x(65)+e*x(63));
(a*x(75)+b*x(65)+c*x(55)+d*x(66)+e*x(64));
(a*x(76)+b*x(66)+c*x(56)+d*x(67)+e*x(65));
(a*x(77)+b*x(67)+c*x(57)+d*x(68)+e*x(66));
(a*x(78)+b*x(68)+c*x(58)+d*x(69)+e*x(67));
(a*x(79)+b*x(69)+c*x(59)+d*x(70)+e*x(68));
(a*x(80)+b*x(70)+c*x(60)+e*x(69));
(a*x(81)+b*x(71)+c*x(61)+d*x(72));
(a*x(82)+b*x(72)+c*x(62)+d*x(73)+e*x(71));
(a*x(83)+b*x(73)+c*x(63)+d*x(74)+e*x(72));
(a*x(84)+b*x(74)+c*x(64)+d*x(75)+e*x(73));
(a*x(85)+b*x(75)+c*x(65)+d*x(76)+e*x(74));
(a*x(86)+b*x(76)+c*x(66)+d*x(77)+e*x(75));
(a*x(87)+b*x(77)+c*x(67)+d*x(78)+e*x(76));

```

(a*x(88)+b*x(78)+c*x(68)+d*x(79)+e*x(77));
(a*x(89)+b*x(79)+c*x(69)+d*x(80)+e*x(78));
(a*x(90)+b*x(80)+c*x(70)+e*x(79));
(a*x(91)+b*x(81)+c*x(71)+d*x(82));
(a*x(92)+b*x(82)+c*x(72)+d*x(83)+e*x(81));
(a*x(93)+b*x(83)+c*x(73)+d*x(84)+e*x(82));
(a*x(94)+b*x(84)+c*x(74)+d*x(85)+e*x(83));
(a*x(95)+b*x(85)+c*x(75)+d*x(86)+e*x(84));
(a*x(96)+b*x(86)+c*x(76)+d*x(87)+e*x(85));
(a*x(97)+b*x(87)+c*x(77)+d*x(88)+e*x(86));
(a*x(98)+b*x(88)+c*x(78)+d*x(89)+e*x(87));
(a*x(99)+b*x(89)+c*x(79)+d*x(90)+e*x(88));
(a*x(100)+b*x(90)+c*x(80)+e*x(89));
(b*x(91)+c*x(81)+d*x(92));
(b*x(92)+c*x(82)+d*x(93)+e*x(91));
(b*x(93)+c*x(83)+d*x(94)+e*x(92));
(b*x(94)+c*x(84)+d*x(95)+e*x(93));
(b*x(95)+c*x(85)+d*x(96)+e*x(94));
(b*x(96)+c*x(86)+d*x(97)+e*x(95));
(b*x(97)+c*x(87)+d*x(98)+e*x(96));
(b*x(98)+c*x(88)+d*x(99)+e*x(97));
(b*x(99)+c*x(89)+d*x(100)+e*x(98));
(b*x(100)+c*x(90)+e*x(99))] +Wk;

```

```

% Pendefinisian Fungsi Pengukuran

```

```

h=@(x) [x(54); x(66); x(74)];

```

```

%Inisialisasi Nilai Awal State CO

```

```

xi = zeros(100,1);

```

```

xi(54)=0;

```

```

xi(66)=0;

```

```

xi(74)=0;

```

```

x=xi+Vk;

```

```

%Membuat Penampung Untuk Hasil Estimasi dan
Pengukuran

```

```

xV=zeros(n,T);

```

```

zV=zeros(m,T);

```

```

sV= zeros(n,T);

```

```

tic

%Unsecented Kalman Filter
for k=1:T
    z=h(x)+randn(m,1); %measurement
    sV(:,k)=x; %save actual state
    zV(:,k)=z; %
    [x,P]=ukf(f,x,P,h,z,Q,R);%Memanggil Function
UKF
    xV(:,k)=x;%Menyimpan Data Hasil Estimasi
    x = f(x)+q*randn(n,1);
end

%Grafik Hasil Estimasi UKF
figure(1)
plot(1:T,abs(xV(54,:)),'-r','linewidth',3);
title('Estimasi UKF Konsentrasi CO di Terminal
joyoboyo');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Estimasi UKF Daerah Terminal joyoboyo');
grid on
figure(2)
plot(1:T,abs(xV(66,:)),'-k','linewidth',3);
title('Estimasi UKF Konsentrasi CO di Stasiun
Gubeng');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Estimasi UKF Daerah Stasiun Gubeng');
grid on
figure(3)
plot(1:T,abs(xV(74,:)),'-b','linewidth',3);
title('Estimasi UKF Konsentrasi CO di Arif
Rahman Hakim');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])

```

```
legend('Estimasi UKF Daerah Arif Rahman Hakim');  
grid on
```

```
%Grafik Error Hasil Estimasi UKF  
figure(4)  
errorUKF_COSUF1=abs(zV(1,:) - xV(54,:));  
plot(errorUKF_COSUF1, '-*b')  
xlabel('variabel x')  
ylabel('nilai error')  
title('Error UKF pada NO2 SUF 1')  
grid on  
figure(5)  
errorUKF_COSUF6=abs(zV(2,:) - xV(66,:));  
plot(errorUKF_COSUF6, '-*r')  
xlabel('variabel x')  
ylabel('nilai error')  
title('Error UKF pada NO2 SUF 6')  
grid on  
figure(6)  
errorUKF_COSUF7=abs(zV(3,:) - xV(74,:));  
plot(errorUKF_COSUF7, '-*g')  
xlabel('variabel x')  
ylabel('nilai error')  
title('Error UKF pada NO2 SUF 7')  
grid on
```

```
%Grafik Hasil Estimasi 3 Lokasi Berbeda UKF  
figure(7)  
plot(1:T, abs(xV(54,:)), '-r', 1:T, abs(xV(66,:)), '-  
k', 1:T, abs(xV(74,:)), '-b', 'linewidth', 3);  
title('Estimasi UKF Konsentrasi Polutan CO');  
xlabel('Waktu ke-');  
ylabel('Nilai Konsentrasi');  
xlim([0 T])  
legend('Estimasi Daerah Terminal  
joyoboyo', 'Estimasi Daerah Stasiun  
Gubeng', 'Estimasi Daerah Arif Rahman Hakim ');  
grid on
```

```

>Data dari Sistem
disp([abs(zV(1,:))]);
disp([abs(zV(2,:))]);
disp([abs(zV(3,:))]);

%Hasil Estimasi CO
disp([abs(xV(54,:))]);
disp([abs(xV(66,:))]);
disp([abs(xV(74,:))]);

%Nilai RMSE CO
RMSECO_SUF1=sqrt((sum((zV(1,:)-xV(54,:)).^2))/T)
RMSECO_SUF6=sqrt((sum((zV(2,:)-xV(66,:)).^2))/T)
RMSECO_SUF7=sqrt((sum((zV(3,:)-xV(74,:)).^2))/T)
toc

```


“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 10. *Source Code* estimasi konsentrasi polutan NO₂ menggunakan *Unscented Kalman Filter* dengan tanpa data pengukuran

```

close all
clear all;
clc;

%Pendefisian Nilai Parameter
n=100; %jumlah state
m=3; %jumlah titik ukur
Dx=36;%koefisien difusi arah x dengan(satuan =
km2/jam)
Dy=36;%koefisien difusi arah y dengan(satuan =
km2/jam)
dx=2; %(satuan = km)
dy=2; %(satuan = km)
Ux=20; %kecepatan aliran udara arah x (satuan =
km/jam)
Uy=20; %kecepatan aliran udara arah y (satuan =
km/jam)
dt=0.01;%0.01; %(satuan = jam)
q=0.01;
r=0.00001;
P=eye(n)*0.001;
Q=q*eye(n);
R=r*eye(m);
Wk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi state
Vk=randn(n,1); %gangguan pada fungsi pengukuran
T=100; %jumlah Iterasi

%Pemisalan dari model sistem
a=((Dx/(dx^2))-(Ux/2*dx))*dt;
b(((1/dt)-(2*Dx)/(dx^2))-(2*Dy/(dy^2)))*dt;
c=((Dx/(dx^2))+(Ux/(2*dx)))*dt;
d=((Dy/(dy^2))-(Uy/(2*dy)))*dt;
e=((Dy/(dy^2))+(Uy/2*dy))*dt;

```

```
% Pendefinisian Fungsi State Estimasi
```

```
f=@(x) [(a*x(11)+b*x(1)+d*x(2));  
(a*x(12)+b*x(2)+d*x(3)+e*x(1));  
(a*x(13)+b*x(3)+d*x(4)+e*x(2));  
(a*x(14)+b*x(4)+d*x(5)+e*x(3));  
(a*x(15)+b*x(5)+d*x(6)+e*x(4));  
(a*x(16)+b*x(6)+d*x(7)+e*x(5));  
(a*x(17)+b*x(7)+d*x(8)+e*x(6));  
(a*x(18)+b*x(8)+d*x(9)+e*x(7));  
(a*x(19)+b*x(9)+d*x(10)+e*x(8));  
(a*x(20)+b*x(10)+e*x(9));  
(a*x(21)+b*x(11)+c*x(1)+d*x(12));  
(a*x(22)+b*x(12)+c*x(2)+d*x(13)+e*x(11));  
(a*x(23)+b*x(13)+c*x(3)+d*x(14)+e*x(12));  
(a*x(24)+b*x(14)+c*x(4)+d*x(15)+e*x(13));  
(a*x(25)+b*x(15)+c*x(5)+d*x(16)+e*x(14));  
(a*x(26)+b*x(16)+c*x(6)+d*x(17)+e*x(15));  
(a*x(27)+b*x(17)+c*x(7)+d*x(18)+e*x(16));  
(a*x(28)+b*x(18)+c*x(8)+d*x(19)+e*x(17));  
(a*x(29)+b*x(19)+c*x(9)+d*x(20)+e*x(18));  
(a*x(30)+b*x(20)+c*x(10)+e*x(19));  
(a*x(31)+b*x(21)+c*x(11)+d*x(22));  
(a*x(32)+b*x(22)+c*x(12)+d*x(23)+e*x(21));  
(a*x(33)+b*x(23)+c*x(13)+d*x(24)+e*x(22));  
(a*x(34)+b*x(24)+c*x(14)+d*x(25)+e*x(23));  
(a*x(35)+b*x(25)+c*x(15)+d*x(26)+e*x(24));  
(a*x(36)+b*x(26)+c*x(16)+d*x(27)+e*x(25));  
(a*x(37)+b*x(27)+c*x(17)+d*x(28)+e*x(26));  
(a*x(38)+b*x(28)+c*x(18)+d*x(29)+e*x(27));  
(a*x(39)+b*x(29)+c*x(19)+d*x(30)+e*x(28));  
(a*x(40)+b*x(30)+c*x(20)+e*x(29));  
(a*x(41)+b*x(31)+c*x(21)+d*x(32));  
(a*x(42)+b*x(32)+c*x(22)+d*x(33)+e*x(31));  
(a*x(43)+b*x(33)+c*x(23)+d*x(34)+e*x(32));  
(a*x(44)+b*x(34)+c*x(24)+d*x(35)+e*x(33));  
(a*x(45)+b*x(35)+c*x(25)+d*x(36)+e*x(34));  
(a*x(46)+b*x(36)+c*x(26)+d*x(37)+e*x(35));  
(a*x(47)+b*x(37)+c*x(27)+d*x(38)+e*x(36));  
(a*x(48)+b*x(38)+c*x(28)+d*x(39)+e*x(37));  
(a*x(49)+b*x(39)+c*x(29)+d*x(40)+e*x(38));
```

(a*x(50)+b*x(40)+c*x(30)+e*x(39));
(a*x(51)+b*x(41)+c*x(31)+d*x(42));
(a*x(52)+b*x(42)+c*x(32)+d*x(43)+e*x(41));
(a*x(53)+b*x(43)+c*x(33)+d*x(44)+e*x(42));
(a*x(54)+b*x(44)+c*x(34)+d*x(45)+e*x(43));
(a*x(55)+b*x(45)+c*x(35)+d*x(46)+e*x(44));
(a*x(56)+b*x(46)+c*x(36)+d*x(47)+e*x(45));
(a*x(57)+b*x(47)+c*x(37)+d*x(48)+e*x(46));
(a*x(58)+b*x(48)+c*x(38)+d*x(49)+e*x(47));
(a*x(59)+b*x(49)+c*x(39)+d*x(50)+e*x(48));
(a*x(60)+b*x(50)+c*x(40)+e*x(49));
(a*x(61)+b*x(51)+c*x(41)+d*x(52));
(a*x(62)+b*x(52)+c*x(42)+d*x(53)+e*x(51));
(a*x(63)+b*x(53)+c*x(43)+d*x(54)+e*x(52));
(a*x(64)+b*x(54)+c*x(44)+d*x(55)+e*x(53));
(a*x(65)+b*x(55)+c*x(45)+d*x(56)+e*x(54));
(a*x(66)+b*x(56)+c*x(46)+d*x(57)+e*x(55));
(a*x(67)+b*x(57)+c*x(47)+d*x(58)+e*x(56));
(a*x(68)+b*x(58)+c*x(48)+d*x(59)+e*x(57));
(a*x(69)+b*x(59)+c*x(49)+d*x(60)+e*x(58));
(a*x(70)+b*x(60)+c*x(50)+e*x(59));
(a*x(71)+b*x(61)+c*x(51)+d*x(62));
(a*x(72)+b*x(62)+c*x(52)+d*x(63)+e*x(61));
(a*x(73)+b*x(63)+c*x(53)+d*x(64)+e*x(62));
(a*x(74)+b*x(64)+c*x(54)+d*x(65)+e*x(63));
(a*x(75)+b*x(65)+c*x(55)+d*x(66)+e*x(64));
(a*x(76)+b*x(66)+c*x(56)+d*x(67)+e*x(65));
(a*x(77)+b*x(67)+c*x(57)+d*x(68)+e*x(66));
(a*x(78)+b*x(68)+c*x(58)+d*x(69)+e*x(67));
(a*x(79)+b*x(69)+c*x(59)+d*x(70)+e*x(68));
(a*x(80)+b*x(70)+c*x(60)+e*x(69));
(a*x(81)+b*x(71)+c*x(61)+d*x(72));
(a*x(82)+b*x(72)+c*x(62)+d*x(73)+e*x(71));
(a*x(83)+b*x(73)+c*x(63)+d*x(74)+e*x(72));
(a*x(84)+b*x(74)+c*x(64)+d*x(75)+e*x(73));
(a*x(85)+b*x(75)+c*x(65)+d*x(76)+e*x(74));
(a*x(86)+b*x(76)+c*x(66)+d*x(77)+e*x(75));
(a*x(87)+b*x(77)+c*x(67)+d*x(78)+e*x(76));
(a*x(88)+b*x(78)+c*x(68)+d*x(79)+e*x(77));
(a*x(89)+b*x(79)+c*x(69)+d*x(80)+e*x(78));

```

(a*x(90)+b*x(80)+c*x(70)+e*x(79));
(a*x(91)+b*x(81)+c*x(71)+d*x(82));
(a*x(92)+b*x(82)+c*x(72)+d*x(83)+e*x(81));
(a*x(93)+b*x(83)+c*x(73)+d*x(84)+e*x(82));
(a*x(94)+b*x(84)+c*x(74)+d*x(85)+e*x(83));
(a*x(95)+b*x(85)+c*x(75)+d*x(86)+e*x(84));
(a*x(96)+b*x(86)+c*x(76)+d*x(87)+e*x(85));
(a*x(97)+b*x(87)+c*x(77)+d*x(88)+e*x(86));
(a*x(98)+b*x(88)+c*x(78)+d*x(89)+e*x(87));
(a*x(99)+b*x(89)+c*x(79)+d*x(90)+e*x(88));
(a*x(100)+b*x(90)+c*x(80)+e*x(89));
(b*x(91)+c*x(81)+d*x(92));
(b*x(92)+c*x(82)+d*x(93)+e*x(91));
(b*x(93)+c*x(83)+d*x(94)+e*x(92));
(b*x(94)+c*x(84)+d*x(95)+e*x(93));
(b*x(95)+c*x(85)+d*x(96)+e*x(94));
(b*x(96)+c*x(86)+d*x(97)+e*x(95));
(b*x(97)+c*x(87)+d*x(98)+e*x(96));
(b*x(98)+c*x(88)+d*x(99)+e*x(97));
(b*x(99)+c*x(89)+d*x(100)+e*x(98));
(b*x(100)+c*x(90)+e*x(99)]+Wk;

```

```

% Pendefinisian Fungsi Pengukuran

```

```

h=@(x) [x(54); x(66); x(74)];

```

```

%Inisialisasi Nilai Awal State CO

```

```

xi = zeros(100,1);

```

```

xi(54)=0;

```

```

xi(66)=0;

```

```

xi(74)=0;

```

```

x=xi+Vk;

```

```

%Membuat Penampung Untuk Hasil Estimasi dan
Pengukuran

```

```

xV=zeros(n,T);

```

```

zV=zeros(m,T);

```

```

sV= zeros(n,T);

```

```

tic

```

```

%Unsecented Kalman Filter
for k=1:T
    z=h(x)+randn(m,1); %measurement
    sV(:,k)=x; %save actual state
    zV(:,k)=z; %
    [x,P]=ukf(f,x,P,h,z,Q,R);%Memanggil Function
UKF
    xV(:,k)=x;%Menyimpan Data Hasil Estimasi
    x = f(x)+q*randn(n,1);
end

%Grafik Hasil Estimasi UKF
figure(1)
plot(1:T,abs(xV(54,:)),'-r','linewidth',3);
title('Estimasi UKF Konsentrasi NO2 di Terminal
joyoboyo');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Data Real','Estimasi UKF Daerah Terminal
joyoboyo');
grid on
figure(2)
plot(1:T,abs(xV(66,:)),'-k','linewidth',3);
title('Estimasi UKF Konsentrasi NO2 di Stasiun
Gubeng');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Data Real','Estimasi UKF Daerah Stasiun
Gubeng');
grid on
figure(3)
plot(1:T,abs(xV(74,:)),'-b','linewidth',3);
title('Estimasi UKF Konsentrasi NO2 di Arif
Rahman Hakim');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])

```

```

legend('Data Real','Estimasi UKF Daerah Arif
Rahman Hakim');
grid on

%Grafik Error Hasil Estimasi UKF
figure(4)
errorUKF_NO2SUF1=abs(zV(1,:)-xV(54,:));
plot(errorUKF_NO2SUF1,'-*b')
xlabel('variabel x')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada NO2 SUF 1')
grid on
figure(5)
errorUKF_NO2SUF6=abs(zV(2,:)-xV(66,:));
plot(errorUKF_NO2SUF6,'-*r')
xlabel('variabel x')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada NO2 SUF 6')
grid on
figure(6)
errorUKF_NO2SUF7=abs(zV(3,:)-xV(74,:));
plot(errorUKF_NO2SUF7,'-*g')
xlabel('variabel x')
ylabel('nilai error')
title('Error UKF pada NO2 SUF 7')
grid on

%Grafik Hasil Estimasi 3 Lokasi Berbeda UKF
figure(7)
plot(1:T,abs(xV(54,:)),'-r',1:T,abs(xV(66,:)),'-
k',1:T,abs(xV(74,:)),'-b','linewidth',3);
title('Estimasi UKF Konsentrasi Polutan NO2');
xlabel('Waktu ke-');
ylabel('Nilai Konsentrasi');
xlim([0 T])
legend('Estimasi Daerah Terminal
joyoboyo','Estimasi Daerah Stasiun
Gubeng','Estimasi Daerah Arif Rahman Hakim ');
grid on

```

```

>Data dari Sistem NO2
disp([abs(zV(1,:))]);
disp([abs(zV(2,:))]);
disp([abs(zV(3,:))]);

%Hasil Estimasi NO2
disp([abs(xV(54,:))]);
disp([abs(xV(66,:))]);
disp([abs(xV(74,:))]);

%Nilai RMSE NO2
RMSENO2_SUF1=sqrt((sum((zV(1,:)-
xV(54,:)).^2))/T)
RMSENO2_SUF6=sqrt((sum((zV(2,:)-
xV(66,:)).^2))/T)
RMSENO2_SUF7=sqrt((sum((zV(3,:)-
xV(74,:)).^2))/T)
toc

```


“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Renita Dianawati. Penulis lahir di Kediri, 09 Maret 1998. Jenjang pendidikan formal yang ditempuh oleh penulis dimulai dari TK Kusuma Mulya (2002-2004), SDN Sukorame 1 Kota Kediri (2004-2010), SMP Negeri 4 Kota Kediri (2010-2013), SMA Negeri 1 Kota Kediri (2013-2016). Kemudian untuk pendidikan selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Matematika Institut Teknologi

Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2016 melalui jalur SBMPTN dengan NRP 06111640000062. Selama mengikuti perkuliahan di ITS, penulis turut aktif beberapa kegiatan kemahasiswaan yakni menjadi Anggota KOPMA Dr. Angka ITS periode 2016/2017. Staff of Media and Information Departemen HIMATIKA ITS periode 2017/2018 dan Penanggung Jawab Mading Departemen Media dan Informasi HIMATIKA ITS periode 2018/2019. Staff Dana Usaha Ibnu Muqlah Matematika ITS periode 2017/2018 dan periode 2018/2019. Staff Kesejahteraan Mahasiswa (KESMA) Bidikmisi ITS periode 2017/2018. Selain aktif di organisasi yang ada di ITS, penulis juga mengikuti kegiatan kepanitiaan seperti panitia OMITS 2018 sebagai Staff of Administration Division Regional dan panitia OMITS 2019 sebagai Staff of Art and Decoration, Ketua Panitia EFL Preparation Bidikmisi ITS tahun 2018, Tim Redaksi Buletin dan majalah “THEIN dan MATOZ” HIMATIKA ITS tahun 2018 dan 2019. Penulis juga mengikuti Kerja Praktek di Badan Pusat Statistika (BPS) pada tahun 2019.