



DINAS LINGKUNGAN HIDUP  
KOTA SURAKARTA  
TAHUN 2023

LAPORAN AKHIR

INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
**KOTA SURAKARTA**  
TAHUN 2023



## **KATA PENGANTAR**

Gas Rumah Kaca (GRK) dipandang sebagai isu penting lingkungan hidup terkini. Untuk memitigasi resiko penurunan kualitas lingkungan, khususnya matra udara akibat peningkatan gas rumah kaca, maka inventarisasi terhadap emisi GRK dipandang penting dan mendesak dilakukan. Urgensi kegiatan ini sebagai respon kondisi global ketika kenaikan temperatur  $1,5^{\circ}\text{C}$  telah terjadi.

Kota Surakarta telah secara rutin melaksanakan inventarisasi GRK sejak tahun 2018. Konsistensi tersebut diharapkan akan memberikan data GRK yang periodik sebagai materi ilmiah maupun landasan bagi penyusunan mitigasi hingga regulasi yang efektif dan tetap sasaran. Inventarisasi GRK juga menjadi wahana evaluasi bagi beragam upaya mitigasi yang telah dilakukan oleh Pemerintah Kota Surakarta. Inventarisasi GRK Tahun 2023 secara khusus akan menunjukkan rebound effect pasca normalisasi kondisi pandemi terhadap kondisi GRK di Kota Surakarta. Inventarisasi tahun 2023 menjadi baseline bagi periode lanjutan RAD GRK dan Perubahan Iklim. Kajian ini mencoba mengevaluasi kegiatan mitigasi sekaligus mengajukan rekomendasi mitigasi berbasis kondisi saat ini.

Keberhasilan pelaksanaan inventarisasi GRK ini dicapai melalui kerjasama yang terbina baik antara DLH Kota Surakarta, PT Adhi Utama selaku pelaksana dan seluruh shareholders lingkungan selaku pemilik data. Kami mengucapkan terimakasih kepada Kepala DLH Kota Surakarta selaku penanggung jawab, penyelenggara, koordinator dan penjamin terlaksana inventarisasi GRK ini.

Untuk kelancaran pelaksanaan pengumpulan data kami mengucapkan terimakasih kepada Walikota Surakarta, instansi-instansi pemerintah, BUMN, hingga perusahaan swasta pemilik data atas aksesibilitas dan kemudahan memperoleh data. Terakhir dan menjadi yang utama adalah ucapan terimakasih serta respek kepada seluruh masyarakat Kota Surakarta atas dukungan hingga kegiatan inventarisasi GRK dapat berlangsung dengan baik.

Hormat kami,

Tim Penyusun

## **DAFTAR ISI**

Kata Pengantar	I
Daftar Isi	ii
Daftar Tabel	iv
Daftar Gambar	vi
<b>BAB I      PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
A      Latar Belakang	1
B      Gas Rumah Kaca dan Dampak Lingkungan	6
C      Respon Pemerintah dalam Mitigasi Gas Rumah Kaca	8
D      Indeks Kualitas Udara Kota Surakarta tahun 2022	12
E      Masalah Gas Rumah Kaca di Kota Surakarta	16
F      Tujuan Kegiatan	18
G      Manfaat Kegiatan	19
<b>BAB II     METODE INVENTARISASI</b>	<b>21</b>
A      Kelembagaan dalam Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca	21
B      Ruang Lingkup Kegiatan	22
1. Cakupan Spasial	22
2. Cakupan Temporal	23
3. Cakupan Metode Kajian	23
C      Persiapan Inventarisasi Gas Rumah Kaca	23
D      Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca	28
E      Analisis Kategori Kunci (Key Categories)	45
F      Analisis Emisi Transportasi Gateways Surakarta	48
G      Analisis dan Interpretasi Hasil	48
<b>BAB III    HASIL INVENTARISASI</b>	<b>50</b>
A      Tingkat, Status dan Kecenderungan Emisi Gas Rumah Kaca	50
1. Review Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Tahun 2022	54
2. Hasil Inventarisasi Gas Rumah Kaca tahun 2023	57
a. Deskripsi Umum	57
b. Pengadaan dan Penggunaan Energi	61
(1) Sektor : Transportasi	67
(2) Sektor : Domestik	90
(3) Sektor : Emisi Bangkitan Listrik	96
(4) Sektor : Industri	102
c. Industrial Process dan Product Use (IPPU)	106
(1) Sektor : Konsumsi Pelumas Industri	109
(2) Sektor : Konsumsi Paraffin Waxes	111
d. Agrikultur, Kehutanan dan Penggunaan Lahan (AFOLU)	115

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



	(1) Sektor : Peternakan	118
	(2) Sektor : Pertanian	124
	(3) Sektor : Penggunaan Lahan	125
	e. Pengolahan Limbah	133
	(1) Sektor : Landfill Sampah	136
	(2) Sektor : Pembakaran Sampah	141
	(3) Sektor : Sanitasi Domestik	143
B	Proyeksi Gas Rumah Kaca Kota Surakarta	148
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISIS KETIDAKPASTIAN DAN KATEGORI KUNCI</b>	151
A	Analisis	151
	Ketidakpastian	
B	Kategori Kunci	154
<b>BAB V</b>	<b>PENGENDALIAN DAN PENJAMINAN MUTU</b>	160
<b>BAB VI</b>	<b>RENCANA PERBAIKAN PENYELENGGARAAN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA</b>	164
A	Perbaikan Koordinasi Data Lokal	164
B	Perbaikan Metode Koleksi Data	166
C	Peningkatan Metode Perhitungan dan Analisis Data	167
D	Perbaikan Quality Assesment (QA)	168
E	Konsistensi dan Kontinuitas	169
F	Evaluasi Diri	169
<b>BAB VII</b>	<b>EVALUASI DAN REKOMENDASI RENCANA AKSI MITIGASI GAS RUMAH KACA</b>	170
A	Rangkuman Evaluasi Rencana Aksi Daerah (RAD) GRK Kota Surakarta 2018-2023	170
B	Evaluasi Rencana Aksi Mitigasi	173
C	Rekomendasi	189
<b>BAB VIII</b>	<b>PENUTUP</b>	194
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	196
	<b>LAMPIRAN</b>	200

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 1	Sumber emisi&distribusi data Kota Surakarta	25
Tabel 2	Jenis gas rumah kaca dan informasi terkait	26
Tabel 3	Nilai GWP pada <i>Second Assessment Report</i>	32
Tabel 4	Revisi Faktor Skala Jenis Tanah Berbeda di Indonesia	41
Tabel 5	Faktor skala yang disesuaikan dengan ekosistem padi dan tata air di Indonesia	42
Tabel 6	Faktor Skala untuk varietas padi yang berbeda di Indonesia	42
Tabel 7	Hasil estimasi GRK Kota Surakarta tahun 2018	41
Tabel 8	Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC tahun 2022	55
Tabel 9	Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC tahun inventarisasi 2023	58
Tabel 10	Hasil inventarisasi GRK kluster pengadaan dan penggunaan energi Kota Surakarta tahun 2023	65
Tabel 11	<i>Net calorific value</i> (NCV) dan faktor emisi aktivitas transportasi	74
Tabel 12	Hasil Inventarisasi GRK Sektor Transportasi Tahun 2023	74
Tabel 13	Informasi umum <i>gateways</i> Kota Surakarta	78
Tabel 14	Detail informasi koridor layanan Batik Solo Trans dan feeder angkot di Kota Surakarta	86
Tabel 15	Konsumsi bahan bakar domestik Kota Surakarta 2022	92
Tabel 16	<i>Net calorific value</i> (NCV) dan faktor emisi aktivitas domestik	93
Tabel 17	Emisi aktivitas domestik Kota Surakarta tahun 2022	93
Tabel 18	Konsumsi listrik berdasarkan kelompok konsumen tahun 2022	97
Tabel 19	Emisi bangkitan listrik Kota Surakarta tahun 2023	98
Tabel 20	Konsumsi bahan bakar sektor industri Kota Surakarta 2022	103
Tabel 21	<i>Net calorific value</i> (NCV) dan faktor emisi aktivitas industri	103
Tabel 22	Emisi aktivitas industri Kota Surakarta tahun 2022	104
Tabel 23	Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori IPPU	108
Tabel 24	Data aktivitas konsumsi pelumas industri Kota Surakarta berdasarkan kelompok industri	110
Tabel 25	Faktor konversi, <i>net calorific value</i> dan konstanta hitung emisi pelumas	110
Tabel 26	Estimasi emisi penggunaan pelumas industri Kota	111

	Surakarta tahun 2023	
Tabel 27	Faktor konversi, <i>net calorific value</i> dan konstanta hitung emisi parafin/wax	112
Tabel 28	Estimasi emisi penggunaan parafin/wax industri batik Kota Surakarta tahun 2020	112
Tabel 29	Faktor emisi penggunaan pelumas kendaraan	113
Tabel 30	Hasil perhitungan GRK pelumas kendaraan bermotor Kota Surakarta tahun 2023	114
Tabel 31	Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori agrikultur, kehutanan dan penggunaan lahan	116
Tabel 32	Data aktivitas peternakan di Kota Surakarta	119
Tabel 33	Faktor emisi metana dari fermentasi enterik dan pengolahan kotoran pada sektor peternakan	120
Tabel 34	Faktor emisi nitrogen dioksida dari emisi langsung pengolahan kotoran pada sektor peternakan	121
Tabel 35	Faktor emisi nitrogen dioksida dari emisi tidak langsung pengolahan kotoran pada sektor peternakan	122
Tabel 36	Hasil inventarisasi gas rumah kaca sektor peternakan	122
Tabel 37	Estimasi serapan karbon dan emisi penggunaan lahan Kota Surakarta	129
Tabel 38	Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori pengolahan limbah	134
Tabel 39	Timbulan sampah Kota Surakarta periode 2007-2022	139
Tabel 40	Komposisi timbulan sampah Kota Surakarta	140
Tabel 41	Estimasi emisi metana landfill sampah di Kota Surakarta tahun 2023	140
Tabel 42	Faktor oksidasi dan faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan beban emisi pembakaran sampah	142
Tabel 43	Profil C pada material sampah terbakar	142
Tabel 44	Beban emisi aktivitas pembakaran sampah Kota Surakarta	143
Tabel 45	Data aktivitas sektor sanitasi domestik Kota Surakarta	145
Tabel 46	Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi CH <sub>4</sub> (metana) sanitasi domestik	146
Tabel 47	Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi N <sub>2</sub> O (nitrogen oksida) sanitasi domestik	147
Tabel 48	Estimasi emisi sektor sanitasi domestik Kota Surakarta tahun 2023	147
Tabel 49	Proyeksi nilai tahunan GRK Kota Surakarta periode 2022-2032	150
Tabel 50	Prosedur umum rencana pengendalian mutu (QC)	162

inventarisasi GRK Kota Surakarta

Tabel 51 Evaluasi rencana aksi mitigasi gas rumah kaca Kota Surakarta 2021 179

### **DAFTAR GAMBAR**

Gambar 1	Komparasi nilai SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> pada empat peruntukkan kegiatan di Kota Surakarta tahun 2022	12
Gambar 2	Nilai indeks kualitas udara berdasarkan peruntukkan kawasan di Kota Surakarta pada tahun 2022	13
Gambar 3	Variasi temporal hasil uji udara ambient pada setiap lokasi pengamatan di Kota Surakarta tahun 2022	14
Gambar 4	Variasi temporal variabel NO <sub>2</sub> dan SO <sub>2</sub> tahun 2022	15
Gambar 5	Siklus pengendalian kualitas udara daerah	16
Gambar 6	Struktur dan hierarki kelembagaan penyusunan dokumen Inventarisasi Gas Rumah Kaca Kota Surakarta tahun 2023	21
Gambar 7	Peta administratif Kota Surakarta	22
Gambar 8	Skema preparasi inventarisasi GRK Kota Surakarta	51
Gambar 9	Dinamika komuter Surakarta pendataan setiap bulan Desember pada periode 2019-2022	52
Gambar 10	Kontribusi kluster GRK pada inventarisasi Kota Surakarta tahun 2022	56
Gambar 11	Dinamika gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta pada periode inventarisasi 2018-2022	57
Gambar 12	Dinamika GRK Kota Surakarta dengan memasukkan nilai bangkitan listrik (atas) dan nilai "fair" tanpa bangkitan listrik (bawah)	59
Gambar 13	Kontribusi sektoral GRK Kota Surakarta dengan memasukkan nilai bangkitan listrik (atas) dan tanpa bangkitan listrik (bawah)	60
Gambar 14	Kontribusi aktivitas pada kluster GRK pengadaan dan penggunaan energi Kota Surakarta tanpa bangkitan listrik	66
Gambar 15	Dinamika konsumsi bahan bakar transportasi Kota Surakarta pada periode 2016-2022	71
Gambar 16	Dinamika kepemilikan dan komposisi kendaraan bermotor Kota Surakarta pada periode 2016-2022	73
Gambar 17	Dinamika gas rumah kaca (GRK) transportasi jalan raya Kota Surakarta periode 2012-2022	75
Gambar 18	Jumlah kendaraan melintas gateways Kota Surakarta berdasarkan jenis moda pada tahun 2022	77

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



Gambar 19	Kontribusi GRK transportasi jalan setiap gateways Kota Surakarta berdasarkan jenis moda kendaraan tahun 2022	78
Gambar 20	Nilai GRK pada setiap gateways berdasarkan analisis GRK per kilometer pada tahun 2022	79
Gambar 21	Komparasi antara komposisi jumlah kendaraan dan kontribusi emisi GRK berdasarkan pada jenis moda di 7 gateways Kota Surakarta pada tahun 2022	80
Gambar 22	Upaya pengelolaan GRK sektor transportasi Kota Surakarta	84
Gambar 23	Dinamika jumlah penumpang bulanan Batik Solo Trans (BST) dan feeder tahun 2022	87
Gambar 24	Dinamika bulanan jumlah kedatangan dan keberangkatan bus di Terminal Tirtonadi, Kota Surakarta pada tahun 2022	89
Gambar 25	Komposisi konsumsi bahan bakar rumah tangga Kota Surakarta tahun 2022	91
Gambar 26	Dinamika GRK bahan bakar domestik Kota Surakarta tahun 2019-2022	94
Gambar 27	Dinamika GRK konsumsi LPG domestik Kota Surakarta tahun 2016-2021	95
Gambar 28	Dinamika GRK konsumsi kayu bakar domestik Kota Surakarta tahun 2019-2021.	95
Gambar 29	Dinamika konsumsi listrik Kota Surakarta pada periode tahun 2016-2022 berdasarkan data awal dan koreksi tahun 2023	98
Gambar 30	Kontribusi GRK bangkitan listrik berdasar sektor konsumen di Kota Surakarta tahun 2022	99
Gambar 31	Komparasi konsumsi energi (atas) dan gas rumah kaca dihasilkan (bawah) dari setiap jenis bahan bakar industri Kota Surakarta	105
Gambar 32	Penjelasan pengelompokkan emisi GRK pada proses industri menurut kategori kunci IPCC	107
Gambar 33	Kontributor emisi pada kluster industrial process and product use (IPPU) Kota Surakarta tahun 2023	109
Gambar 34	Komposisi jenis ternak Kota Surakarta tahun 2022	120
Gambar 35	Tren GRK peternakan di Kota Surakarta pada 2017-2022	124
Gambar 36	Komposisi penggunaan lahan Kota Surakarta tahun 2021	127
Gambar 37	Perubahan penggunaan lahan Kota Surakarta pada tahun 2021 terhadap data tahun 2016	128
Gambar 38	Peta gross primary products Kota Surakarta tahun 2022	130
Gambar 39	Temperatur rata rata Kota Surakarta pada tahun 2021	131
Gambar 40	Perubahan land surface temperature (LST) Kota Surakarta	132



Gambar 41	Kontributor emisi pada kluster pengolahan limbah Kota Surakarta tahun 2023	135
Gambar 42	Pertumbuhan produksi sampah Kota Surakarta tahun 2007-2022	136
Gambar 43	Data pengelolaan sampah di Kota Surakarta 2022	137
Gambar 44	Dinamika GRK Landfill Putri Cempo Kota Surakarta tahun 2007-2023	141
Gambar 45	Hasil proyeksi GRK Kota Surakarta 2022-2032 bersama dinamika setiap sub sektor	149
Gambar 46	Proyeksi GRK Kota Surakarta tahun 2022-2032 skenario dengan dan tanpa emisi bangkitan	150
Gambar 47	Struktur generik analisis ketidakpastian	152
Gambar 48	Mekanisme QA/QC internal dan eksternal	161
Gambar 49	Skema dokumentasi dan koordinasi shareholders lokal	165
Gambar 50	Penurunan emisi dan efektivitas capaian implementasi RAD GRK Kota Surakarta tahun 2018-2023	172
Gambar 51	Evaluasi rencana aksi mitigasi gas rumah kaca Kota Surakarta 2021	179

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



## BAB I PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Laporan AR 6 Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) mencatat kenaikan suhu telah mencapai 1,1° C pada 2020. Nilai tersebut telah mendekati batas maksimal kesepakatan global Paris Agreement pada 1,5° C. Laporan terbaru World Meteorological Organization (WMO) pada 2023 menunjukkan potensi pelampauan 1,5° C sebesar 67% pada periode 2023-2027. Pemicu kondisi tersebut adalah kondisi pencemaran terutama emisi GRK yang sulit dikendalikan. Dampak pelampauan 1,5° C adalah peningkatan frekwensi bencana meteorologis yang dapat berimbas pada ketahanan pangan, kehilangan habitat hingga kerugian material bagi manusia.

Riset Henderson et al (2018) menunjukkan mayoritas penduduk bumi menyepakati perubahan iklim sebagai masalah bagi peradaban modern. Lebih dari 54% warga dari 40 negara responden memandang serius masalah tersebut. Kesadaran masyarakat dunia dipicu oleh luasan dan durasi dampak perubahan iklim terhadap kehidupan bumi. Dampak tersebut dirasakan semakin merata dan tidak lagi menjadi definisi *intangibile*. Salah satunya adalah kenaikan temperatur permukaan bumi. Kenaikan temperatur secara signifikan sebagai penanda perubahan iklim mengakibatkan berbagai kerusakan lingkungan. Data *World Meteorological Organization* (WMO) mencatat periode 2014-2019 sebagai peningkatan temperatur tertinggi permukaan bumi.

Bumi mengalami perubahan nyata akibat kenaikan temperatur. Kondisi tersebut berupa kehilangan habitat beserta biodiversitas, kenaikan permukaan laut, bencana hidrometeorologis hingga penurunan fungsi dan produktivitas lingkungan. Hal tersebut berdampak beragam fungsi dan jasa ekosistem, memperburuk ancaman terhadap daya dukung dan daya tampung lingkungan.

Indonesia menjadi bagian global terdampak oleh fenomena akibat perubahan iklim, terutama pada kawasan pesisir dan perkotaan. Model kenaikan muka air laut memprediksikan kehilangan beberapa kawasan pesisir termasuk di utara Pulau Jawa pada periode 10 tahun. Prediksi tersebut menjadi kenyataan dengan fenomena banjir rob dan abrasi yang memburuk pada beberapa tahun terakhir. Wilayah perkotaan menengah dan besar mengalami dampak faktual berupa fenomena *urban heat island*.

Gas rumah kaca (GRK) dipandang secara objektif sebagai penyebab eskalasi fenomena perubahan iklim. Hal ini tidak lepas dari korelasi antara peningkatan GRK antropogenik secara signifikan dengan kenaikan temperatur yang menjadi penanda perubahan iklim. Emisi GRK merupakan entropi penggunaan dan konversi energi (*combustive* maupun *fugitive*). Hal ini terutama sebagai dampak inefisiensi dan inefektivitas konsumsi energi. Penggunaan energi meningkat seiring pertumbuhan populasi, kebutuhan antropogenik serta ketergantungan pada energi fosil. Pada sisi berbeda, alih fungsi lahan memberikan tekanan negatif pada pengendalian GRK akibat reduksi ketersediaan vegetasi terutama pada kawasan perkotaan.

Energi sebagai kontributor utama GRK merupakan dilema akibat ketergantungan manusia terutama pada energi fosil. Konsumsi energi yang terus meningkat, tidak diikuti oleh pengembangan teknologi rendah emisi dan energi terbarukan. Sebagai contoh adalah sumber pembangkitan energi listrik di Indonesia yang hingga tahun 2017 sebesar 57% produksi masih bergantung pada batubara. Kondisi serupa terjadi pada alih teknologi maupun konversi bahan bakar ramah lingkungan pada kendaraan bermotor. Situasi ironi jika mempertimbangkan signifikansi penggunaan listrik dan moda transportasi bermotor dalam aktivitas modern. Paradoks tersebut menjadikan emisi memenuhi karakter khas masalah lingkungan menurut Mitchell dkk (2000) yaitu : dinamis, kompleks, ketidakpastian dan rentan konflik.

Perubahan karakter penggunaan lahan menjadi kawasan urban menjadi tantangan besar mitigasi-adaptasi GRK. Kawasan urban merupakan

penghasil GRK signifikan melalui aktivitas antropogenik beragam serta berskala masif. Riset Gulia et al (2014) dan Fan et al (2017) menemukan simpang utama dan *central business district* menjadi kontributor utama GRK transportasi secara spasial. Perubahan kawasan penyangga menjadi bercorak urban dan ketergantungan masyarakat sekitar (*hinterland*) menambah episentrum GRK pada jalur gerbang dan transit (Himawan, 2023). Riset Liu et al (2022) menemukan bahwa karakter oemukiman padat dan kegiatan sosioekonomi urban menjadi pemicu GRK potensial. Persepsi mayoritas masyarakat urban terhadap upaya mitigasi adaptasi GRK menjadi paradoks. Peranserta masyarakat dalam upaya tersebut dipandang masih rendah terutama pada kota-kota di Indonesia.

Kota Surakarta merupakan wilayah pusat kegiatan perekonomian maupun pelayanan jasa bagi kawasan sekitarnya. Hal ini menjadikan kawasan urban Surakarta memiliki intensitas dan keragaman aktivitas manusia yang tinggi dan potensial menghasilkan GRK dalam jumlah signifikan. Resiko emisi GRK tersebut didukung oleh situasi sebagai berikut.

1. Perkembangan aktivitas urban yang cenderung tereskalasi meningkat pada setiap tahunnya dengan ditandai oleh peningkatan populasi maupun perubahan lahan menjadi fasilitas perdagangan dan jasa
2. Proyeksi kota sebagai pusat MICE (*meeting, incentives, convention and exhibition*) yang secara langsung akan mendorong kehadiran pengunjung dengan beragam mobilitas dan aktivitasnya
3. Aktivitas komuter dari kawasan *hinterland* yang didominasi oleh kendaraan pribadi (sepeda motor maupun mobil). Penelitian Sunarto et al (2016) menunjukkan bahwa emisi CO<sub>2</sub> di jalur gerbang kota memiliki kontribusi signifikan pada emisi transportasi Surakarta.
4. Preferensi moda transportasi yang condong pada kendaraan bermotor pribadi dibandingkan moda publik yang ditandai dengan konsistensi peningkatan kepemilikan unit kendaraan bermotor.

5. Lokasi Kota Surakarta secara geografis menjadi kawasan lintas utama dan transit bagi perjalanan antar kota maupun provinsi di Pulau Jawa.
6. Keterbatasan *carrying capacity* dalam pengembangan lahan antropogenik, fasilitas penunjang maupun ruang pengendali emisi natural (vegetasi)

Kota Surakarta masih berkembang sebagai kawasan perkotaan. Kondisi tersebut menyebabkan *urban sprawl* dengan potensi meningkatkan aktivitas komuter sekaligus ketergantungan yang semakin tinggi pada kawasan urban.

Kategori penggunaan energi tercatat sebagai kontributor utama GRK Kota Surakarta dengan kategori kunci adalah emisi transportasi. Inventarisasi GRK pada 2022 menunjukkan kontribusi sektor konsumsi energi mencapai 93% (dengan memasukkan emisi bangkitan listrik) dan 66% (tanpa memasukkan bangkitan listrik). Transportasi jalan raya menjadi kontributor utama emisi GRK penggunaan energi Kota Surakarta dengan komposisi mencapai 72% (setara dengan 309192 CO<sub>2</sub>e/tahun). Nilai tersebut konsisten mengalami peningkatan terhadap tahun sebelumnya. Hasil penelitian menunjukkan determinasi aktivitas komuter sangat signifikan terhadap GRK transportasi jalan raya Kota Surakarta.

Kota Surakarta kini berada pada fase percepatan pembangunan. Beragam pembangunan infrastruktur dilaksanakan untuk menyokong peningkatan perekonomian maupun visi sebagai Kota MICE. Pada tahun 2023, setidaknya terdapat 17 pembangunan prioritas di Kota Surakarta. Pembangunan tersebut meliputi Masjid Raya Sheikh Zayed, Islamic Centre, revitalisasi Ngarsopuro-Koridor Gatot Subroto, revitalisasi Taman Balekambang, Museum of Culture and Technology, Solo Safari, Sentra UKM Pasar Mebel Gilingan, PSEL Putri Cempo, Elevated Rail Simpang Tujuh Joglo, revitalisasi Pasar Jongke, revitalisasi gedung olahraga (GOR) Manahan, revitalisasi Solo Technopark, revitalisasi Lokananta, revitalisasi shelter

Manahan, revitalisasi Pura Mangkunegaran, penataan kawasan kumuh Semanggi-Mojo serta revitalisasi Keraton Kasunanan.

Mayoritas pembangunan dan revitalisasi merupakan obyek potensial bagi pariwisata dan kegiatan perdagangan besar. Pembangunan masif tersebut akan berdampak pada penambahan tekanan lingkungan, termasuk potensi peningkatan GRK. Mayoritas obyek tersebut memiliki potensi tinggi menarik kunjungan wisatawan dan menjadi bangkitan GRK baru pada masa depan, terutama dari kategori kunci transportasi jalan raya. Hal ini tentu saja menjadi tambahan pemikiran terkait rencana mitigasi dan adaptasi GRK Kota Surakarta.

Dokumen inventarisasi GRK menjadi data dasar yang berguna dalam perencanaan lingkungan maupun mitigasi terhadap kerentanan perubahan iklim kawasan perkotaan. Kota Surakarta menempatkan isu perubahan iklim dan kemacetan lalu lintas sebagai prioritas pengelolaan lingkungan. Hal tersebut menunjukkan urgensi tinggi pengelolaan faktor pendorong perubahan iklim di Kota Surakarta yang langsung menysasar pada transportasi jalan raya.

Penyusunan dokumen inventarisasi GRK Kota Surakarta bertujuan untuk melakukan estimasi ulang terhadap perubahan emisi tahunan. Estimasi tersebut akan berperan sebagai pembaharuan data GRK sekaligus evaluasi terhadap pelaksanaan program-program untuk menekan rasio peningkatan GRK Kota Surakarta.

Penyusunan dokumen ini sekaligus dapat berperan sebagai dasar mitigasi maupun pendekatan penyempurnaan mitigasi yang telah ada bagi upaya pengendalian emisi GRK pada tahap berikutnya. Hal ini berkaitan erat dengan komitmen Indonesia untuk menekan GRK sebesar 29%-41% pada 2030.

## B. Gas Rumah Kaca (GRK) dan Dampak Lingkungan

Gas rumah kaca (GRK) merupakan salah satu jenis emisi yang beresiko secara langsung pada lingkungan. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer memicu efek dengan nama serupa yang berdampak pada peningkatan suhu bumi global (*global warming*) dan mendorong fenomena perubahan iklim (*climate change*).

Efek rumah kaca (ERK) pada awalnya menjadi media penyesuaian lingkungan bumi untuk menampung kehidupan. ERK mengakhiri era es, menyediakan suhu lebih hangat dan oksigen bagi kehidupan di bumi. Penambahan emisi atmosfer akibat aktivitas antropogenik mempercepat mekanisme rumah kaca yang ditandai dengan kenaikan temperatur bumi secara signifikan.

Emisi GRK mengalami peningkatan signifikan sejak era Revolusi Industri 1.0. Gas Rumah Kaca meningkat dari 290 ppm CO<sub>2</sub>eq pada 1880 menjadi 430 ppm pada 2013 (Worldbank, 2014). Nilai tersebut mengalami peningkatan 60% pada periode 1990-2014 akibat aktivitas urban dan modernisasi ((Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014). Kondisi tersebut menjustifikasi GRK sebagai pemicu perubahan iklim (WMO, 2019) sekaligus mendorong AR5 menunjuk aktivitas manusia sebagai faktor pressure (IPCC, 2015).

Perubahan iklim didefinisikan sebagai perubahan pada kondisi iklim berdasarkan perhitungan rata-rata atau variabilitas properti penyusunnya pada periode panjang (> 100 tahun). Perubahan tersebut disebabkan oleh faktor alam internal maupun eksternal sistem bumi dan pada saat ini didominasi oleh kontribusi aktivitas antropogenik yang mengubah komposisi gas penyusun atmosfer maupun alih fungsi lahan (IPCC, 2012).

Henderson et al (2018) mendeskripsikan beberapa dampak dari peningkatan GRK sebagai indikasi perubahan iklim : peningkatan level permukaan air laut, perubahan pola cuaca dan cuaca ekstrim, tekanan pada air dan makanan, resiko politik dan keamanan, resiko kesehatan manusia serta dampak pada ekosistem dan biodiversitas. Masalah ekosistem antara



lain dipicu oleh kenaikan permukaan laut, asidifikasi dan toksifikasi lautan (Mikinmaa, 2013; Das dan Mangwani, 2015), pergeseran habitat pada ekosistem terestrial maupun akuatik hingga peningkatan kejadian bencana hidrometeorologi (IPCC, 2014). Ragam dampak tersebut berpengaruh negatif pada keseluruhan komponen lingkungan, termasuk manusia.

Pada upaya pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDG), perubahan iklim menjadi ancaman krisis terbesar. Perubahan iklim dapat mempengaruhi keseluruhan poin pada SDGs. Kerusakan lingkungan akibat perubahan iklim potensial bersifat *irreversibel* dan sangat mempengaruhi pada kesetimbangan *supply demand* pada daya dukung dan daya tampung lingkungan. Gangguan tersebut kemudian akan berpengaruh pada sasaran harmoni dan keberlanjutan pembangunan yang bersifat global, tidak terbatas oleh wilayah administratif.

Perubahan iklim memiliki status spesifik sebagai poin ke 13 *Sustainable Development Goals*. Hal tersebut menunjukkan perhatian sekaligus kesadaran besar dari komunitas global terhadap ancaman perubahan iklim. Poin perubahan iklim akan mempengaruhi poin lain seperti kesehatan dan kesejahteraan (SDGs 3), akses air bersih dan sanitasi (SDGs 6), kota dan komunitas berkelanjutan (SDGs 11), ekosistem laut (SDGs 14) dan ekosistem terestrial (SDGs 15). Permasalahan pada capaian poin tersebut pada akhirnya akan berdampak pada ketimpangan (SDGs 10) hingga kegagalan penanggulangan kemiskinan (SDGs 1).

Indonesia memiliki kerentanan tinggi terhadap perubahan iklim didorong oleh faktor intensitas pembangunan dan bentuk geografis. Indonesia saat ini berada dalam fase membangun dengan penggunaan bahan bakar dan alih fungsi lahan yang tinggi. Mayoritas wilayah berubah menjadi kawasan perkotaan (Sarosa, 2020) dan praktis mengalami peningkatan kontribusi GRK. Bentuk geografis sebagai negara kepulauan dengan banyak kawasan pesisir akan meningkatkan dampak kerusakan akibat kenaikan level muka air laut (Zikra et al, 2015). Hasil penelitian Naturezza (2009) menunjukkan ancaman kenaikan level muka air laut

Indonesia antara 1,17 mm/tahun-14,1 mm/tahun. Kerentanan Indonesia juga berasal dari peningkatan potensi bencana hidrometeorologis akibat perubahan pola cuaca. Presipitasi cenderung mengalami peningkatan dan terjadi kekeringan ekstrim (Mc Gregor et al, 2015). Dampak lebih lanjut pada situasi tersebut adalah ancaman pada sektor penyediaan pangan.

### **C. Respon Pemerintah dalam Mitigasi Gas Rumah Kaca (GRK)**

Pemerintah menempatkan upaya mitigasi dan perencanaan kualitas udara sebagai bagian penting pengelolaan lingkungan. Hal tersebut tercantum dalam Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021 tentang "Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup". Selaras dengan upaya pengelolaan lingkungan hidup secara umum, upaya pengelolaan kualitas udara dilaksanakan dengan pendekatan berbasis resiko. Pendekatan ini membuat konteks pengelolaan udara menjadi lebih luas dan kompleks karena akan mencakup keseluruhan kemungkinan resiko, bukan semata yang pasti terjadi. Kondisi yang membuat posisi inventarisasi emisi menjadi krusial demi memetakan resiko emisi berbasis potensi optimal, tidak sebatas pada hasil pengujian ambient.

Pemerintah Indonesia menunjukkan komitmen dalam upaya mitigasi GRK melalui ratifikasi *Paris Agreement* (PA). Ratifikasi tersebut dimunculkan dalam format legal sebagai Undang Undang (UU) No 16 Tahun 2016. Melalui kesepakatan tersebut, Indonesia bersama dengan negara-negara di dunia berkomitmen untuk menahan laju peningkatan suhu rata-rata global dibawah 2°C dan melanjutkan upaya untuk menekan kenaikan suhu rata-rata global ke 1,5°C di atas tingkat pra-industrialisasi. Sebagai tindak lanjut komitmen tersebut, Indonesia menetapkan target penurunan emisi (*Nationally Determined Contribution*/NDC) sebesar 26% dengan upaya sendiri sampai dengan 41% dengan dukungan kerjasama internasional dari kondisi tanpa ada aksi (*business as usual*) pada 2030. NDC Indonesia mencakup aspek aksi mitigasi, aksi adaptasi dan dukungan sumber daya

mencakup pendanaan, peningkatan kemampuan dan alih teknologi perubahan iklim (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020).

Indonesia menghadapi tren peningkatan wajar konsumsi energi akibat kenaikan kebutuhan pembangunan maupun konsekuensi populasi. Sektor dengan kontribusi terbesar pada kebutuhan energi hingga 2030 adalah industri dan transportasi. Kajian Santika et al (2020) menyatakan bahwa Indonesia harus memberikan perhatian pada upaya reduksi energi transportasi. Skenario BAU dan SDG menunjukkan pada 2025 sektor transportasi di Indonesia akan mengkonsumsi energi lebih tinggi daripada industri. Dewan Energi Nasional (DEN) melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) mencanangkan program konversi bahan bakar berbasis petroleum untuk moda transportasi menjadi listrik, gas alam, biodiesel dan etanol.

Indonesia memiliki Rencana Aksi Nasional untuk mereduksi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK). Dokumen ini berupa rencana kerja antara instansi pusat dengan pemerintah lokal untuk mengimplementasi beragam aktivitas dalam rangka reduksi rasio peningkatan GRK. Pemerintah Indonesia memiliki komitmen untuk menurunkan emisi GRK 26% dengan upaya sendiri dan 41% dengan bantuan internasional. Komitmen tersebut tercantum dalam Keputusan Presiden No 61 Tahun 2011 (Ofrial et al, 2015).

Pemerintah Indonesia merilis regulasi sebagai bukti kepedulian pemerintah untuk memenuhi salah satu hak dasar penduduk yaitu lingkungan hidup yang sehat, sesuai dengan Undang-Undang Dasar 1945. Perhatian terhadap emisi dipandang sebagai bagian penting penyediaan lingkungan hidup yang sehat. Pemerintah menyadari emisi sebagai permasalahan dan ancaman bagi lingkungan hidup, sehingga secara khusus meregulasikan peraturan terkait upaya pengelolaan kualitas udara. Regulasi-regulasi tersebut antara lain adalah :

- a. Undang Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

- b. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
- c. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca
- d. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 71 Tahun 2011 tentang Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional
- e. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara
- f. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 18 tahun 2015 tentang Organisasi dan Tata Kerja Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, penyelenggaraan Inventarisasi GRK, serta Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV)
- g. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 73 Tahun 2017 tentang Pedoman Penyelenggaraan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional
- h. Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 2 Tahun 2006 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup

Urgensi inventarisasi emisi muncul secara eksplisit pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang "Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup". Pasal 164 menegaskan inventarisasi udara sebagai bagian integratif dari perencanaan perlindungan dan pengelolaan mutu udara dengan perhitungan emisi sebagai salah satu tahapan penting (Pasal 166). Fungsi inventarisasi adalah untuk penentuan status mutu udara bersama dengan variabel lain seperti : pemantauan udara ambien, potensi sumber pencemar udara, kondisi meteorologis dan geografis dan tata guna tanah.

Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah menjadi pendorong bagi kesadaran dan inisiatif pemerintah daerah untuk melakukan mitigasi pada kualitas udara daerahnya. Pada regulasi tersebut, pemerintah

pusat mewajibkan pemerintah daerah untuk melakukan inventarisasi emisi, sebagai dasar penentuan baku mutu udara lokal sesuai karakter lingkungan setempat. Hasil inventarisasi menjadi landasan bagi penyusunan rencana aksi pengelolaan kualitas udara lokal (*air quality management-AQM*).

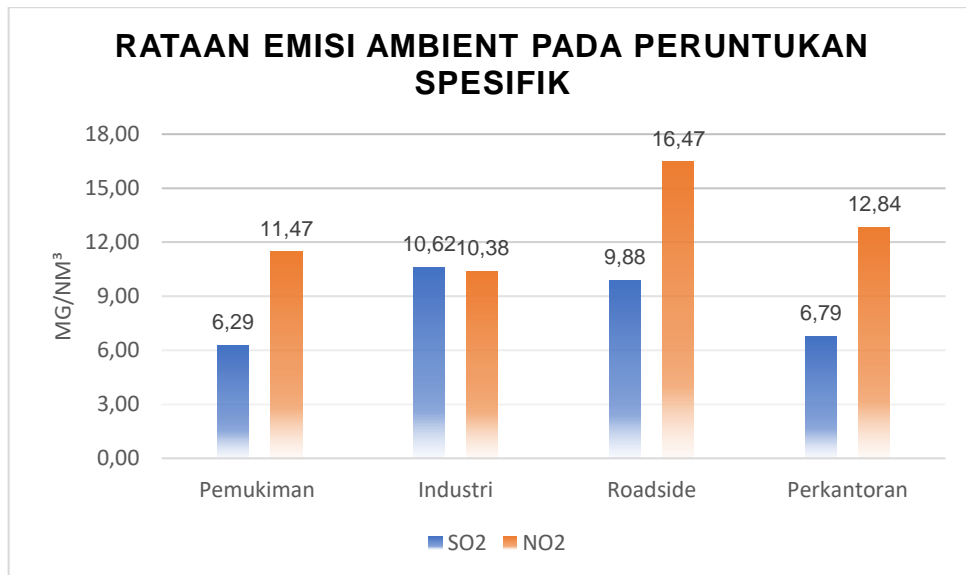
Inventarisasi emisi merupakan bagian dari upaya mitigasi lingkungan, sesuai dengan Undang-Undang No 24 Tahun 2007 tentang "Penanggulangan Bencana". Inventarisasi emisi menjadi bagian upaya proaktif untuk mengurangi resiko bencana, terutama sebagai dampak penurunan kualitas udara lokal. Sesuai dengan regulasi tersebut, penurunan kualitas udara secara absolut termasuk sebagai bagian bencana lingkungan karena resiko dampak dan ancaman pada kehidupan manusia.

Inventarisasi emisi merupakan salah satu metode estimasi emisi melalui pendekatan perhitungan. Inventarisasi emisi memunculkan data resmi jumlah emisi yang dikeluarkan ke atmosfer pada sumber berbeda dan periode tertentu (Gioli, et al, 2015). Inventarisasi emisi dimanfaatkan sebagai basis pemodelan kualitas udara, kaitannya dengan potensi emisi masing-masing aktivitas, distribusi emisi dan identifikasi potensi tindakan reduksi emisi (Fu, et al, 2013; McGraw, et al, 2010 dalam Shahbazi, et al, 2016).

Mitigasi perubahan iklim menjadi agenda penting negara negara anggota G20. Isu utama yang terangkat antara lain terkait pemulihan yang berkelanjutan dapat dikaitkan dengan target Paris Agreement dan Glasgow Climate Pact, penelitian dan pengembangan Blue Carbon, dan potensi laut dalam mitigasi perubahan iklim. Seluh negara mencanangkan peningkatan upaya mitigasi melalui aksi nyata tingkat tapak dengan Indonesia memiliki program kampung iklim sebagai unggulan. Pada aspek pembangunan berkelanjutan, mitigasi perubahan iklim menjadi wahana bagi pencapaian beberapa poin Sustainable Development Goals (SDGs) dengan kegiatan inventarisasi berperan sebagai penyedia data dasar sekaligus wahana keterukuran keberhasilan program.

#### D. Indeks Kualitas Udara Kota Surakarta tahun 2022

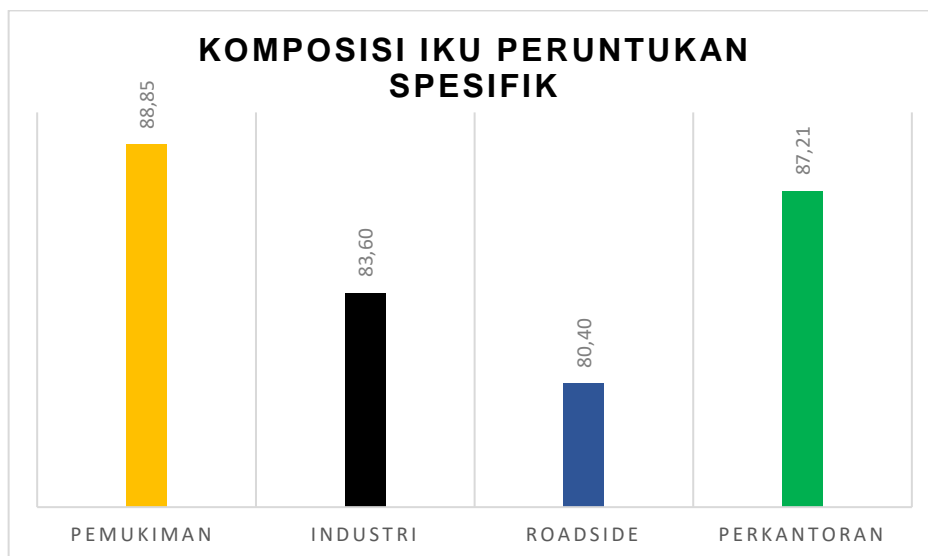
Nilai IKU berdasarkan olesan data riil menunjukkan angka 85,21 dari olahan keseluruhan 46 titik. Nilai tersebut lebih baik daripada hasil hitungan pada website IKLH, namun tidak berbeda signifikan. Kedua nilai yang dihasilkan sama-sama mengindikasikan kondisi kualitas udara yang baik. Penilaian IKU hanya menggunakan dua variabel kualitas udara yaitu  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$ . Kedua variabel tersebut diasumsikan mewakili emisi pembakaran bahan bakar cair dan padat selain karbon. Berikut adalah detail hasil pemantauan udara ambient pada masing masing lokasi dengan kegiatan antropogenik dominan yang spesifik di Kota Surakarta.



**Gambar 1. Komparasi nilai  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada empat peruntukkan kegiatan di Kota Surakarta tahun 2022 (Sumber : pengolahan data DLH Surakarta, 2023)**

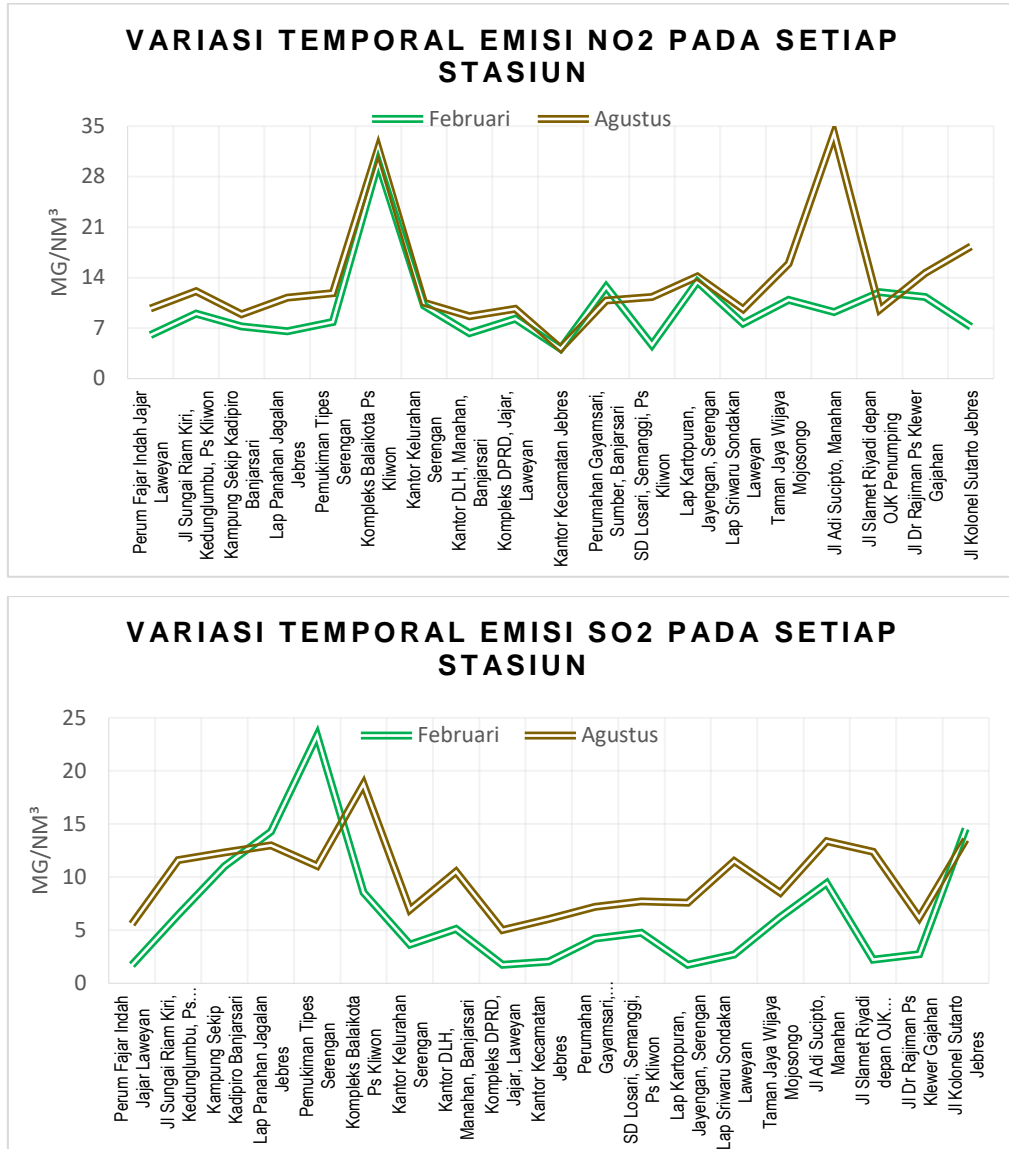
Kajian komparasi spasial dilakukan melalui perbandingan hasil uji udara ambien pada 4 lokasi sampel berdasarkan kategori aktivitas antropogenik dominan. Komparasi temporal dilakukan berdasarkan hasil pada dua waktu pengambilan sampel. Hasil komparasi secara spasial menunjukkan nilai tertinggi untuk  $\text{NO}_2$  diperoleh di kawasan roadside dan perkantoran. Nilai  $\text{NO}_2$  muncul lebih tinggi dibandingkan  $\text{SO}_2$  pada mayoritas

kawasan kecuali peruntukkan industri dengan selisih yang tipis. Kondisi ini disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor utama karena profil karakter Kota Surakarta yang mendorong transportasi dengan penggunaan bahan bakar cair menjadi dominan. Faktor kedua adalah kondisi lingkungan yang membawa emisi industri masuk ke Kota Surakarta pada wilayah tertentu.



**Gambar 2. Nilai indeks kualitas udara berdasarkan peruntukkan kawasan di Kota Surakarta pada tahun 2022**

Pemukiman memiliki nilai terendah untuk parameter  $\text{NO}_2$  maupun  $\text{SO}_2$ . Hal ini merupakan indikator yang ideal mempertimbangkan resiko lebih tinggi pencemaran pada kawasan dengan populasi padat. Emisi  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  diketahui memiliki dampak langsung pada kesehatan manusia maupun lingkungan. Kondisi ideal pada keduanya akan menjamin ketersediaan taraf kesehatan yang baik dan ditunjang oleh keberlangsungan lingkungan. Nilai  $\text{NO}_2$  tertinggi didapat di kawasan roadside dan perkantoran mengindikasikan arus lalu lintas yang konsisten pada level tinggi di kawasan tersebut.



**Gambar 3. Variasi temporal hasil uji udara ambient pada setiap lokasi pengamatan di Kota Surakarta tahun 2022 (sumber : pengolahan data DLH Kota Surakarta, 2023)**

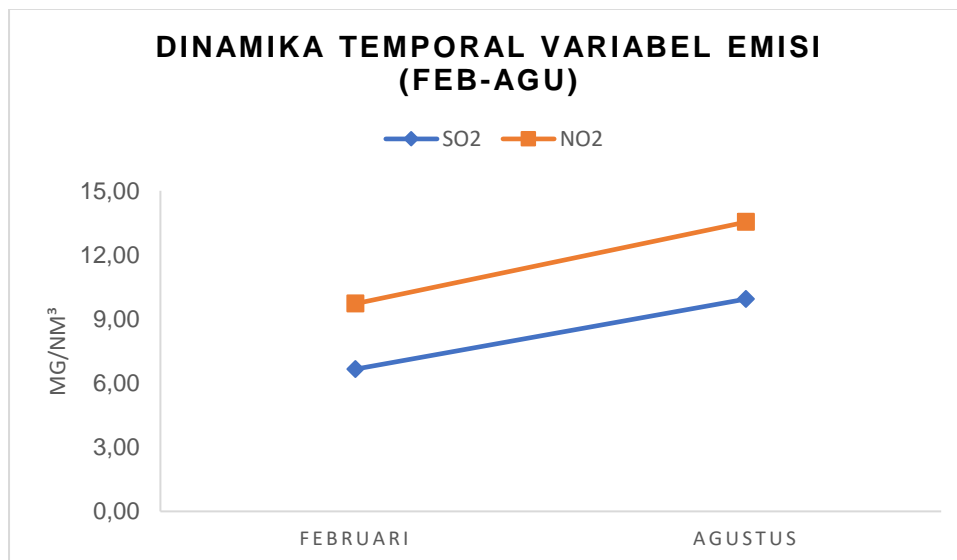
Konversi hasil evaluasi SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> sebagai IKU menunjukkan nilai terbaik kualitas udara ditemukan pada kawasan pemukiman (88,85) dan perkantoran (87,21). Nilai terburuk diperoleh pada kawasan roadside/transportasi (80,40). Kondisi ini berubah dari pola tahun sebelumnya yang memunculkan nilai IKU terburuk pada kawasan industri. Hal ini disebabkan oleh normalisasi situasi pasca pandemi melalui rileksasi kebijakan pembatasan kegiatan maupun mobilisasi masyarakat. Secara



umum seluruh kawasan masih mengindikasikan kondisi yang baik meski perlu diberikan prioritas pengelolaan pada kawasan industri.

Variasi temporal menunjukkan konsistensi peningkatan nilai emisi ambient untuk  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  pada musim kemarau. Hasil ini terutama jelas teramati pada pemantauan oleh DLH Kota Surakarta. Hujan (pada pengambilan bulan Agustus) menyebabkan nilai emisi untuk variabel gas  $\text{NO}_2$  maupun  $\text{SO}_2$  menjadi lebih rendah. Perbedaan belum signifikan karena bulan tersebut masih menjadi awalan penghujan dengan frekwensi maupun intensitas hujan belum terlampau tinggi. Variabel  $\text{NO}_2$  memiliki konsistensi lebih tinggi pada perubahan musim yang berarti perbedaan nilai ambient tidak signifikan. Kondisi ini menunjukkan kontribusi masif sektor transportasi terhadap kualitas udara Kota Surakarta.

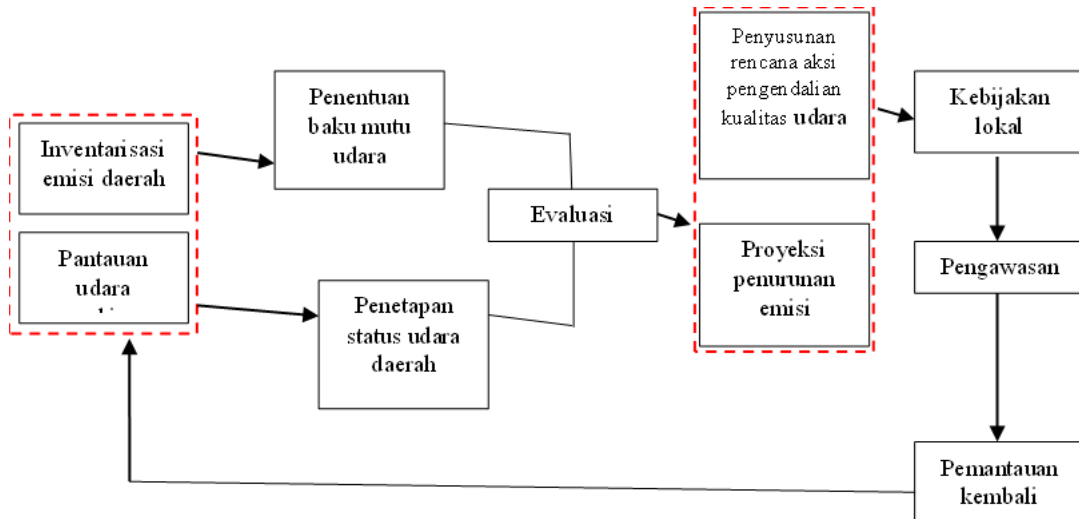
Kondisi pada emisi  $\text{NO}_2$  terpengaruh pula oleh situasi lalu lintas yang mengalami lonjakan pesat pasca pandemi pada semester dua 2022. Peningkatan mobilitas antarkota teramati dari lesatan nilai emisi  $\text{NO}_2$  di jalan Adi Sucipto yang memiliki peran sebagai akses masuk kota sekaligus menuju jalur transit reguler maupun jalan tol. Hal sama teramati pada Jalan Sutarto yang memiliki peran sama dengan Jalan Adii Sucipto.



**Gambar 4. Variasi temporal variabel  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  (nilai rerata pada periode sampling bulan Februari dan Agustus) tahun 2022 (sumber : pengolahan data DLH Kota Surakarta, 2023)**

### E. Masalah gas rumah kaca di Kota Surakarta

Kota Surakarta merupakan wilayah berkategori kota kecil-sedang yang menuju kawasan metropolitan baru di regional Jawa Tengah. Luasan wilayah administratif Surakarta adalah 46,72 km<sup>2</sup>, seluruhnya berada di kawasan dataran rendah (BPS Surakarta, 2021) yang mengindikasikan emisi akan dipengaruhi secara mutlak oleh kondisi iklim. Sebagian besar wilayah Surakarta, saat ini difungsikan untuk aktivitas antropogenik urban (DLH Surakarta, 2017), dengan menyisakan sedikit kawasan ruang terbuka hijau. Hal ini menunjukkan keterbatasan pengendali emisi natural, sehingga upaya reduksi emisi jangka pendek akan terfokus pada penurunan potensi sumber emisi dan perencanaan optimasi kawasan vegetasi dalam menyerap emisi.



**Gambar 5. Siklus pengendalian kualitas udara daerah**

Kota Surakarta memiliki pengalaman menyelenggarakan inventarisasi emisi (IE) dengan pendekatan *bottom up* pada 2013. Inventarisasi tersebut memunculkan estimasi emisi 729.961 tonCO<sub>2</sub>/tahun. Sebesar 78% emisi tersebut disumbangkan oleh transportasi jalan raya (Setyono et al, 2014). Salah satu fokus utama pada emisi transportasi adalah intensitas komuter dari wilayah administratif penyangga (hinterland) Surakarta, yang dibuktikan dengan nilai emisi tinggi pada jalur-jalur gerbang kota (Sunarto et al, 2016).

Inventarisasi gas rumah kaca (GRK) dengan metode top down pertama kali dilaksanakan di Surakarta pada 2011. Inventarisasi GRK dengan pendekatan top down dilaksanakan pada 2018. Inventarisasi tersebut menjadi data pendahulu bagi dokumen ini karena kesamaan metode dan mempertimbangkan rentang waktu inventarisasi sebelumnya yang terlampau lama. Hasil inventarisasi GRK 2018 memperoleh nilai emisi 1,36 juta ton CO<sub>2</sub>e/tahun. Emisi tersebut terutama dikontribusikan oleh kategori konsumsi energi, secara khusus pada transportasi jalan raya.

Tren kontributor emisi CO<sub>2</sub> Surakarta selaras dengan kondisi kawasan urban di Indonesia (KLHK, 2012), maupun yang terjadi secara global (USEPA, 2008) dengan kecenderungan terus meningkat pada pusat perekonomian, akses jalan utama dan simpang lalu lintas penting (Gulia et al, 2014). Riset Tiseo (2022) menunjukkan kontribusi transportasi terhadap GRK global mencapai 20,7%. Nilai tersebut meningkat dibandingkan laporan AR5 pada 2015 yang mencapai 14%. Transportasi jalan raya menyumbang 75% GRK dengan faktor kunci berupa peningkatan kepemilikan dan penggunaan kendaraan pribadi. Kondisi emisi Surakarta diperburuk dengan indeks tutupan vegetasi yang rendah di Surakarta (skor 30,82), luas ruang terbuka hijau publik terbatas pada 9,18% kawasan (Pemerintah Kota Surakarta, 2023), dengan asumsi bahwa keberadaan vegetasi memiliki kemampuan alami untuk menyerap karbon.

Inventarisasi GRK pada 2022 menunjukkan GRK penggunaan energi menjadi kategori kunci. Kontribusi sektor penggunaan energi mencapai 93,20% (mengikuti bangkitan listrik) dan 65,93% (jika tanpa mengikuti bangkitan listrik). Transportasi jalan raya menjadi kontributor utama emisi GRK penggunaan energi Kota Surakarta dengan komposisi mencapai 71,93% (setara dengan 309192 CO<sub>2</sub>e/tahun). Kontribusi transportasi jalan raya terhadap keseluruhan GRK Kota Surakarta mencapai 47,42%. Nilai tersebut mengalami peningkatan terhadap tahun sebelumnya. Tren GRK Kota Surakarta masih meningkat dari tahun ke tahun, terutama sebagai dampak aktivitas transportasi.

Kota Surakarta menghadapi problematika GRK transportasi jalan raya dari sumber komuter dan transit. Peningkatan jumlah kendaraan pribadi pada kawasan hinterland dan kawasan lain akan memberikan dampak pada GRK Surakarta. Problematika dari luar wilayah administratif lebih sulit diselesaikan. Integrasi kebijakan perlu dilakukan untuk dapat memperoleh hasil mitigasi adaptasi yang baik untuk menekan GRK transportasi jalan raya Kota Surakarta.

Merujuk pada hasil IE Surakarta, hipotesis kategori kunci setempat adalah sektor penggunaan energi, khususnya pada sektor transportasi dan rumah tangga (domestik). Meskipun demikian, terdapat probabilitas besar munculnya kecenderungan emisi berbeda antara IE Surakarta 2013 dan inventarisasi GRK ini. Hal tersebut didorong oleh perbedaan pendekatan pengumpulan data (*bottom up* dan *top down*) serta dipengaruhi secara signifikan oleh karakter emisi transportasi lokal Surakarta.

Kegiatan inventarisasi gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta dipandang sebagai milestone penting dalam evaluasi dan penyusunan ulang manajemen kualitas udara (AQM). Inventarisasi GRK akan menyediakan data-data valid dan ilmiah terkait potensi emisi Kota Surakarta, secara khusus pada tiga parameter hitung : karbondioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) dan nitrogen dioksida (N<sub>2</sub>O). Informasi krusial dalam laporan ini adalah kategori kunci sumber emisi yang dapat dijadikan prioritas utama penanganan emisi lokal, tanpa mengabaikan keberadaan sumber-sumber lainnya.

## **F. Tujuan Kegiatan**

Berdasarkan paparan dari latar belakang kegiatan, maka tujuan pelaksanaan kegiatan ini dirumuskan sebagai berikut

1. Mengidentifikasi sumber-sumber emisi potensial dan mengumpulkan data terkait inventarisasi emisi GRK dari masing-masing sumber tersebut

2. Menganalisis beban emisi GRK tahunan berdasarkan spesifikasi aktivitas penyumbang emisi dan variabel emisi yang diperhitungkan
3. Menentukan kategori kunci dalam emisi GRK di Kota Surakarta
4. Melakukan evaluasi dan rekomendasi terkait dengan mitigasi reduksi GRK di Kota Surakarta

### **G. Manfaat Kegiatan**

Pelaksanaan inventarisasi emisi gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta dapat bermanfaat sebagai :

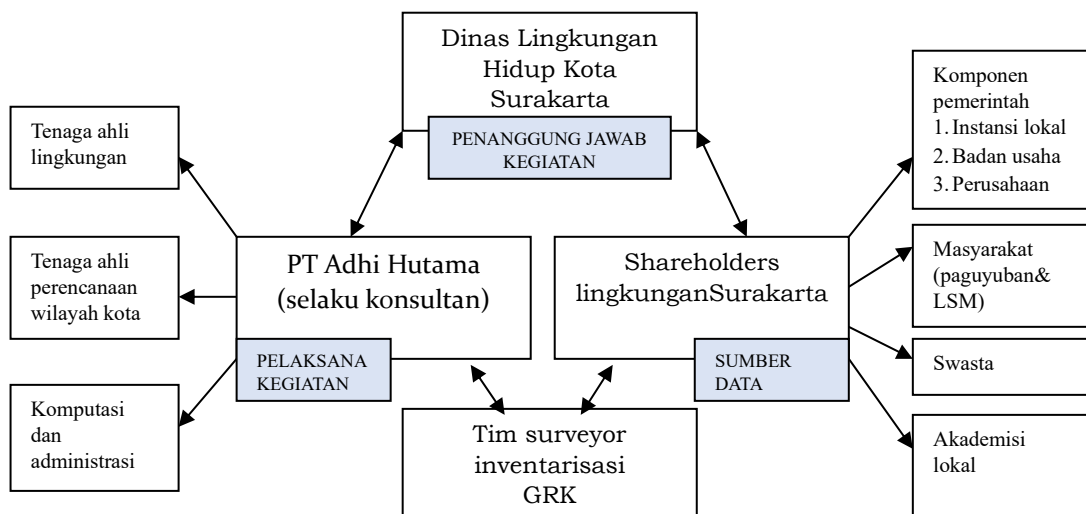
1. Untuk mengidentifikasi sumber pada wilayah administratif Kota Surakarta
2. Untuk mengetahui beban emisi pada wilayah administratif Kota Surakarta
3. Untuk menentukan prioritas reduksi emisi berbasis pada hasil analisis kategori kunci pada setiap kategori sumber emisi dan potensi ancamannya pada lingkungan Kota Surakarta
4. Sebagai bagian dari material prediksi kualitas udara lokal melalui kombinasi hasil inventarisasi emisi dengan data monitoring (pengukuran) udara ambien, data klimatologi dan baku mutu kualitas udara
5. Hitungan beban emisi dapat menjadi input bagi model dispersi emisi atmosferik yang saat ini banyak digunakan dan memegang peranan penting dalam manajemen kualitas udara dan penggunaan lahan perkotaan
6. Kombinasi hasil inventarisasi emisi dengan monitoring udara ambien (melalui pengukuran lapangan) dan kondisi lingkungan lokal dapat digunakan sebagai bahan penentuan baku mutu kualitas udara daerah yang bersifat lebih spesifik dan sesuai dengan karakter lokal
7. Sebagai dasar penyusunan regulasi terkait dan perencanaan pengelolaan kualitas udara di Kota Surakarta

8. Sebagai media informasi mengenai kondisi kualitas lingkungan, khususnya terkait dengan beban emisi GRK dan kualitas udara kepada masyarakat Kota Surakarta, sebagai pihak utama yang memiliki hak atas ketersediaan dan akses pada informasi tersebut
9. Sebagai media evaluasi terhadap pelaksanaan regulasi maupun program mitigasi GRK pada suatu wilayah administratif

## BAB II. METODE INVENTARISASI

### A. Kelembagaan dalam Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca

Pengerjaan Inventarisasi Emisi GRK Kota Surakarta tahun 2022 melibatkan *shareholders* lingkungan setempat yang mencakup komponen pemerintah lokal (instansi), badan usaha milik pemerintah, perusahaan negara, swasta, masyarakat dan akademisi. Pihak konsultan sebagai eksekutor dan penyusun laporan bekerjasama dengan *shareholders*, secara khusus untuk memperoleh data-data aktivitas pendukung perhitungan. Penyusunan laporan inventarisasi GRK menjadi kerja kolektif antara *shareholders* lingkungan setempat dan konsultan dengan masing-masing memiliki proporsi dan tugas berbeda dalam kegiatan ini.



**Gambar 6. Struktur dan hierarki kelembagaan penyusunan dokumen Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kota Surakarta tahun 2023**

Secara umum, terdapat tiga komponen utama dalam kelembagaan dalam inventarisasi gas rumah kaca Kota Surakarta yaitu : penanggung jawab, pelaksana kegiatan dan sumber data. Penanggung jawab kegiatan adalah Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta, selaku agensi yang secara khusus mengemban tanggung jawab pelaksanaan bidang lingkungan.

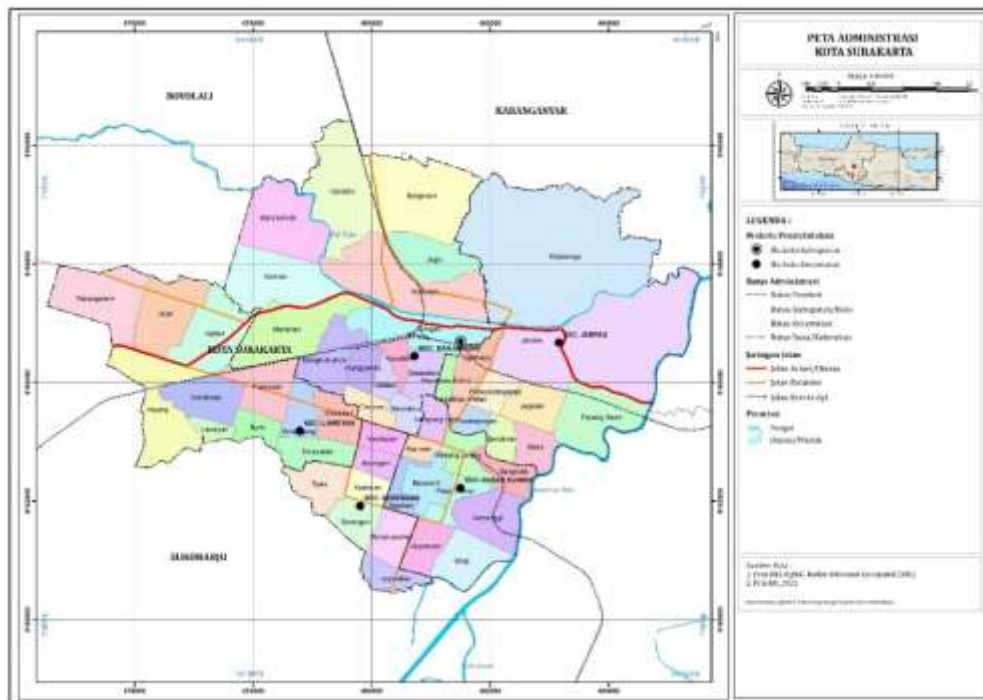
Pelaksana kegiatan adalah PT Adhi Utama (CGS) yang terdiri dari ahli lingkungan, ahli perencanaan wilayah kota didukung oleh bagian komputasi dan administrasi.

Shareholder lingkungan setempat memiliki posisi vital sebagai penyedia data aktivitas. Data tersebut merupakan dasar dari estimasi emisi pada metode inventarisasi. Oleh sebab itu, keakuratan dan keterbaruan emisi lokal akan bergantung pada data-data yang disediakan oleh shareholders terdiri dari : aspek pemerintah, swasta, masyarakat dan akademisi.

## **B. Ruang Lingkup Kegiatan**

### **1. Cakupan spasial**

Cakupan spasial inventarisasi gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta adalah sumber-sumber emisi yang terletak di dalam wilayah administratif. Artinya, inventarisasi tidak dilakukan pada sumber yang terletak di luar, berdekatan atau berbatasan dengan wilayah administratif, meskipun sumber tersebut memiliki potensi emisi signifikan.



**Gambar 7. Peta administratif Kota Surakarta**



## 2. Cakupan temporal

Inventarisasi GRK mengandalkan data sekunder sebagai sumber data aktivitas. Hal ini sesuai dengan pendekatan koleksi data kegiatan ini yaitu *top down*. Oleh sebab itu, penting ditentukan data tahun dasar yang akan digunakan. Berdasarkan pertimbangan ketersediaan data (mempertimbangkan waktu pelaksanaan kegiatan), maka ditentukan bahwa data tahun dasar paling lama adalah tahun 2021, dengan mengupayakan secara optimal untuk penggunaan data tahun dasar 2022.

## 3. Cakupan metode kajian

Metode inventarisasi emisi merupakan evaluasi emisi berbasis perhitungan dengan menggunakan formula emisi dasar. Koleksi data aktivitas dilaksanakan dengan pendekatan *top down*. Faktor emisi mayoritas menggunakan standar dalam "*Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory*" dari IPCC (2006). Beberapa faktor emisi akan menggunakan ketersediaan standar lokal, seperti yang diaplikasikan pada konsumsi listrik. Tier perhitungan akan menyesuaikan pada ketersediaan data aktivitas dengan probabilitas lebih besar untuk pengaplikasian Tier I dan Tier II. Parameter yang diinventarisasi mencakup karbondioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) dan nitrogen dioksida (N<sub>2</sub>O). Pengelompokan sumber emisi dilakukan berbasis kategori dalam IPCC meliputi : (a) penggunaan energi; (b) proses dan penggunaan produk dalam industri; (c) pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan; dan (d) pengelolaan limbah.

### **C. Persiapan Inventarisasi Gas Rumah Kaca**

Gas rumah kaca (GRK) atau *greenhouse gas* (GHG) adalah gas gas yang berada di lapisan atmosfer dengan kemampuan untuk menyerap dan mengemisikan radiasi pada rentang cahaya inframerah. Proses ini menjadi mekanisme utama penyebab efek rumah kaca. Gas rumah kaca primer di atmosfer bumi antara lain uap air, karbondioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) dan ozon (O<sub>3</sub>). Gas rumah kaca merupakan fenomena wajar bahkan turut membantu pembentukan kehidupan di bumi.

Tanpa GRK, suhu bumi kemungkinan hanya akan mencapai  $-18^{\circ}\text{C}$  dan adanya GRK menaikkan suhu tersebut (Wikipedia, 2016)

Inventarisasi emisi pada dasarnya merupakan kegiatan identifikasi emisi suatu wilayah yang meliputi pada sumber dan asumsi nilainya. Dasar penentuan beban emisi adalah data aktivitas sumber-sumber emisi. Data aktivitas berasal dari pengumpulan secara langsung atau data primer baik berupa wawancara, kuisisioner, pengamatan maupun pendataan. Jalur lebih sederhana adalah melalui dokumen data aktivitas yang disediakan pemerintah, swasta maupun akademis (sekunder).

Preparasi inventarisasi emisi GRK pada dasarnya akan mempersiapkan dan menentukan hal-hal sebagai berikut :

1. Area dan waktu penelitian, tahun data dasar (*baseline year*) karena menggunakan pendekatan *top down*

Pengumpulan data memiliki 2 metode umumnya yaitu : ***bottom up*** (data primer) dan ***top down*** (data sekunder). Pada pelaksanaannya, pemilihan metode tersebut akan bergantung pada alokasi waktu dan sumber daya yang tersedia. Pemilihan metode ***bottom up*** akan menuntut waktu dan biaya lebih besar. Hasil kedua metode tidak bisa diperbandingkan karena pendekatan berbeda antara keduanya. Biasanya keduanya dikombinasikan menyesuaikan pada kondisi lapangan. Khusus untuk kegiatan inventarisasi GRK, metode koleksi data yang diaplikasikan adalah *top down* dengan mengutamakan penggunaan data sekunder resmi maupun *expert judgement*.

2. Penentuan sumber emisi yang akan diinventarisasi,  
Sumber emisi ditentukan dan diprioritaskan berdasarkan pertimbangan karakteristik wilayah, ketersediaan sumber daya dan waktu pelaksanaan. Karakter lokal merujuk pada aktivitas utama pada suatu wilayah yang berpotensi menghasilkan emisi yang signifikan. Pemilihan sumber emisi berkarakter lokal akan menurunkan resiko ketidakpastian dan selisih hitung dengan kondisi riil.

### **Tabel 1. Sumber emisi&distribusi data Kota Surakarta**

<b>No</b>	<b>Kategori emisi</b>	<b>Detail kegiatan</b>
1	Penggunaan energi	Konsumsi energi domestik, industri, dan perdagangan (Non listrik) Konsumsi listrik keseluruhan Konsumsi energi transportasi, mencakup jalan raya dan kereta api
2	Proses dan penggunaan produk untuk industri	Penggunaan oli/pelumas industri Penggunaan lilin/wax/malam
3	Pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan	GRK Peternakan (fermentasi enterik dan pengolahan kotoran) GRK Pertanian (pengolahan sawah, pembakaran biomass, aplikasi urea dan pengolahan lahan) Landuse (perubahan dalam reduksi karbon)
4	Pengelolaan limbah	Sanitasi masyarakat Pengolahan sampah

*Sumber : pengolahan kondisi rill Kota Surakarta dikomparasikan dengan pedoman IPCC (2006)*

### 3. Penentuan parameter Gas Rumah Kaca (GRK)

Keseluruhan gas emisi memiliki kontribusi terhadap terjadinya efek rumah kaca beserta dampaknya terhadap lingkungan. Perbedaan terletak pada sifat dampaknya, ada yang bersifat secara langsung adapun beberapa gas berdampak secara tidak langsung. Parameter utama dalam inventarisasi secara global adalah karbondioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) dan nitrogen dioksida (N<sub>2</sub>O). Ketiganya merupakan parameter emisi dengan produksi dan resiko besar pada aktivitas antropogenik.

**Tabel 2. Jenis gas rumah kaca dan informasi terkait**

<b>Jenis gas rumah kaca</b>	<b>Kontributor utama saat ini</b>	<b>Prediksi daur hidup dalam atmosfer</b>	<b>Potensi peringkat pemanasan global dalam 100 tahun</b>
Karbon dioksida	Diemisikan secara primer melalui proses pembakaran bahan bakar fosil, limbah pada dan produk tanaman. Alih fungsi lahan menjadi salah satu pemicu peningkatan gas ini. Tanaman memiliki kemampuan untuk menyerap setidaknya hingga sepertiganya, sayangnya kondisi ini diperburuk dengan maraknya deforestasi	Tidak dapat diprediksi, tidak rusak dalam waktu panjang namun hanya dapat mengalami perubahan formasi	1
Methan	Methan diemisikan dalam proses produksi dan transportasi	12 tahun	21

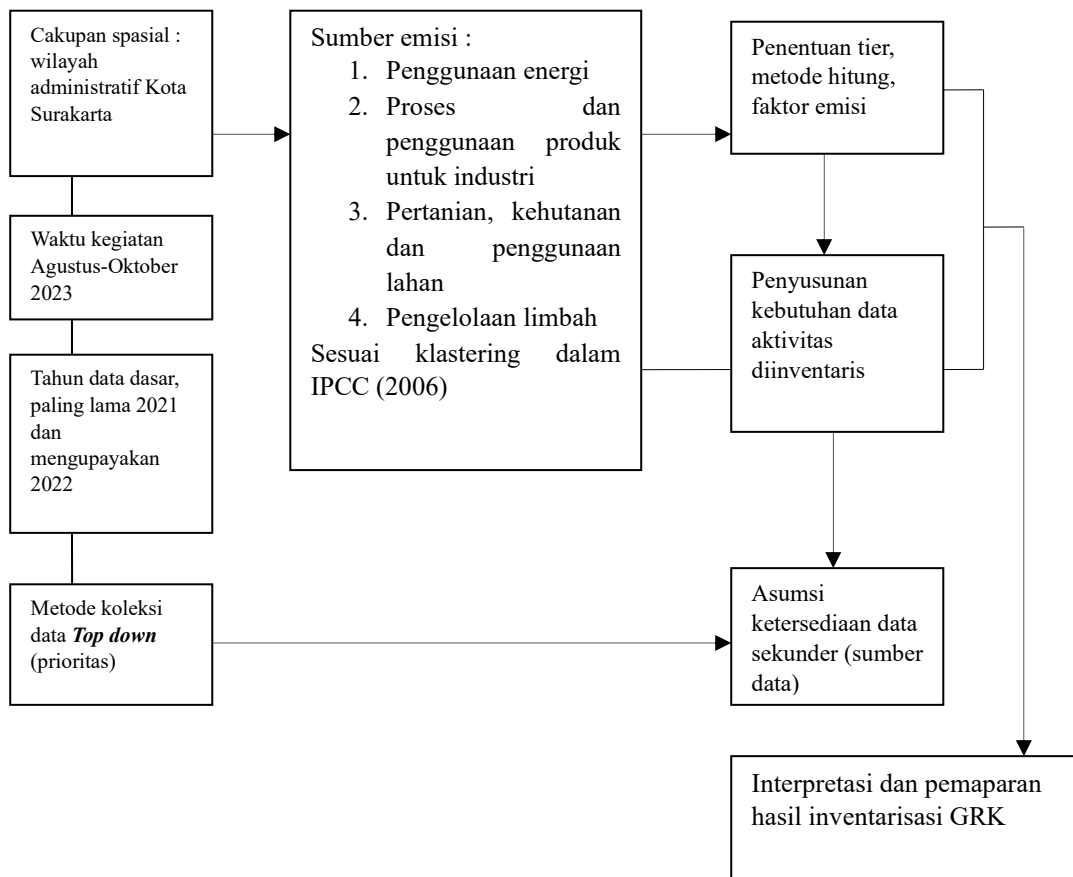
---

	bahan bakar fosil. Saat ini emisi metan lebih jamak dikaitkan dengan emisi peternakan dan proses pertanian. Metan juga dihasilkan pada pembusukan anaerobik limbah padat di landfill (TPA)		
Nitrogen dioksida	Diemisikan dalam aktivitas pertanian dan industri terutama pada pembakaran bahan bakar fosil atau limbah padat	114 tahun	310

---

*Sumber : USEPA, 2011*

4. Penentuan tier perhitungan, metode perhitungan dan faktor emisi yang akan diaplikasikan
5. Penyusunan daftar kebutuhan data aktivitas yang akan diinventarisasi dari masing masing sumber emisi
6. Perumusan pemaparan hasil emisi, disesuaikan dengan tujuan awal pelaksanaan inventarisasi emisi



**Gambar 8. Skema preparasi inventarisasi GRK Kota Surakarta**

Tahapan persiapan menjadi dasar bagi perencanaan dan persiapan inventarisasi. Pada konteks satuan kerja, tahapan ini menjadi wahana menyatukan konsep dan pembagian tugas setiap personel. Untuk keberhasilan proses, salah satu komponen utama yang harus dimiliki personel adalah komitmen dan versatilitas fungsi dengan pembatasan.

#### **D. Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)**

Metodologi yang digunakan pada perhitungan emisi GRK mengacu pada metode yang ditetapkan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines* dalam IPCC Guidelines 2006. Penerapan metodologi ini telah ditetapkan dalam Peraturan Menteri LHK Nomor P.73/MenLHK/Setjen/Kum.1/12/2017 tanggal 29 Desember 2017 tentang Pedoman Penyelenggaraan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca.

Inventarisasi emisi berbasis pada pendekatan hitung yang bermakna melakukan estimasi terhadap potensi emisi optimal pada setiap kegiatan. Formula baku perhitungan berdasarkan pada pedoman inventarisasi gas rumah kaca IPCC (2006) sebagai berikut.

$$E = AD \times EF$$

Dengan

- E = Beban emisi yang ditanggung oleh wilayah pada periode tertentu (ton/tahun)
- AD = Data aktivitas dari sumber emisi (menyesuaikan)
- EF = Faktor emisi (menyesuaikan)

*(IPCC, 2006; Corinair, 2013)*

Aplikasi teknologi pengendali emisi umumnya menjadi upaya reduksi emisi yang dilakukan oleh sektor industri, khususnya industri besar. Penurunan emisi oleh teknologi ini diperhitungkan dengan memasukkan persen efisiensi reduksinya. Namun, pengendali emisi hanya berperan untuk menurunkan emisi PM atau debu. Oleh sebab itu, nilai pengendalian emisi tidak dapat digunakan dalam inventarisasi emisi GRK ini.

#### 1. Data aktivitas

Data aktivitas merujuk pada nilai yang menjadi variabel penentu besaran emisi karena berasal dari aktivitas antropogenik spesifik. Contoh untuk data aktivitas seperti jumlah konsumsi bahan bakar, konsumsi pelumas, jumlah dan jenis ternak dan lain sebagainya. Data aktivitas tidak selalu berkaitan dengan penggunaan bahan bakar karena emisi dapat berasal dari proses pembakaran (*combustive*), larian gas (*fugitive*) hingga emisi pengangkutan dan injeksi CO<sub>2</sub>. Data aktivitas pada inventarisasi GRK berbasis top down yang berasal dari dokumen sekunder otoritas kegiatan terkait.

Data sekunder dapat berupa dokumen pemerintah, catatan distribusi/penjualan tahunan maupun *expert judgement* dari kegiatan serupa sebelumnya. Pendekatan *top down* juga memberikan akses bagi penyediaan data berdasarkan tren atau mengkombinasikan ketersediaan pada beberapa dokumen atau *expert judgement*. Batasan operasional

secara spasial maupun temporal mengikuti pada ketentuan ruang lingkup kegiatan (poin B). Perbedaan data antar instansi akan diklarifikasi melalui proses *Quality Asesment* dan *Quality Control*.

## 2. Faktor emisi

Faktor emisi adalah konstanta yang menunjukkan rasio emisi pada suatu penggunaan material atau proses dalam satuan massa per kalor atau unit (tergantung pada emisi kegiatan yang dihitung). Faktor emisi secara umum telah tersedia di pedoman IPCC atau menggunakan angka spesifik suatu negara.

Penyelenggara Inventarisasi GRK melakukan upaya pengumpulan dan pengembangan faktor emisi lokal melalui kerjasama dengan instansi, lembaga, dan perguruan tinggi yang melakukan penelitian faktor emisi. Dalam hal faktor emisi lokal belum tersedia, maka digunakan faktor emisi lokal yang tersedia untuk daerah lain atau faktor emisi nasional atau regional yang sudah tersedia atau default yang ditetapkan IPCC. Kompilasi faktor emisi dari berbagai negara dan wilayah dihimpun dalam Basis Data untuk Faktor Emisi (*Emission Factor Database*).

Untuk kegiatan Inventarisasi GRK Surakarta, sumber faktor emisi adalah :

- IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory* (2006) yang dicantumkan kembali dalam Petunjuk Teknis Inventarisasi Gas Rumah Kaca Kementerian Lingkungan Hidup RI (2011)
- Faktor emisi lokal, digunakan pada beberapa perhitungan berdasarkan ketersediaan secara lokal/nasional (misalnya pada konsumsi listrik) atau asumsi hitungan berbasis karakter lingkungan setempat (misalnya pada beberapa emisi pertanian)

## 3. Tier perhitungan

Tier merujuk pada kedalaman metode yang dipergunakan dalam mengestimasi beban emisi. Semakin tinggi nilai Tier, maka akan semakin



kompleks perhitungan, semakin detail data aktivitas dan semakin mendekati tingkat keakuratan kondisi riil. Meskipun demikian, fakta bahwa data aktivitas kerap kali terbatas dan tidak terakses, khususnya pada metode koleksi top down menyebabkan pilihan Tier menjadi terbatas pada level-level awal. Secara umum, dalam inventarisasi emisi maupun inventarisasi GRK akan dikenal tiga tingkatan Tier dalam perhitungan sebagai berikut :

a. Tier I

Metode perhitungan emisi dan serapan menggunakan persamaan dasar dan faktor emisi default atau IPCC default values dan data aktivitas yang digunakan sebagian berasal dari data global

b. Tier II

Perhitungan emisi dan atau serapan menggunakan persamaan yang lebih rinci, misalnya persamaan reaksi atau neraca material dan menggunakan faktor emisi lokal yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung dan data aktivitas berasal dari sumber data nasional dan/atau daerah

c. Tier III

Metode perhitungan emisi dan serapan karbon menggunakan metode paling rinci (dengan pendekatan *modelling* dan *sampling*). Melalui pendekatan modeling, faktor emisi lokal dapat divariasikan sesuai dengan keberagaman kondisi yang ada sehingga emisi dan serapan akan memiliki tingkat kesalahan lebih rendah.

Secara realistis, estimasi emisi GRK Surakarta hanya akan menggunakan Tier I dan II. Hal ini menyesuaikan dengan metode pengumpulan data (*top down*) serta ketersediaan variasi data tersebut yang tidak memungkinkan untuk level Tier perhitungan lebih tinggi.

Hasil akhir perhitungan yang masih terdiri dari 3 variabel GRK terestimasi (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O) dikonversikan menjadi karbondioksida ekuivalen (CO<sub>2</sub>eq) untuk memudahkan interpretasi. Proses konversi dilakukan dengan memanfaatkan nilai *Global Warming Potential* (GWP) sebagai konstanta pengali variabel non CO<sub>2</sub>. Hal ini sesuai dengan *Second Assessment Report* (2nd AR of IPCC). Nilai GWP dimaksud sebagaimana

**Tabel 3. Nilai GWP pada *Second Assessment Report (2nd AR of IPCC)***

No.	Gas	GWP (CO <sub>2</sub> eq)
1	CO <sub>2</sub>	1
2	Methane (CH <sub>4</sub> )	21
3	Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O)	310
4	PFC-14 (CF <sub>4</sub> )	6.500
5	PFC-116 (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	9.200
6	Sulfur hexafluoride (SF <sub>6</sub> )	23.900

### **Perhitungan Sektor Energi**

Tingkat emisi GRK yang tercantum dalam inventarisasi sektor energi dihitung menggunakan Tier 1 dan Tier 2 metode IPCC 2006 dengan nilai faktor emisi default dan data aktivitas dalam unit energi (SBM, setara barel minyak) yang dikumpulkan dari Tabel Keseimbangan Energi (*Energy Balance Table*) pada *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia* (HEESI), yang dipublikasikan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM). Emisi sektor energi dihitung menggunakan metode *reference approach*. Metode *reference approach* merupakan pendekatan *top-down* dihitung menggunakan data agregat dari suplai energi pada sebuah kawasan perkotaan

### **Perhitungan Sektor *Industrial Process and Product Use***

Estimasi nilai emisi GRK untuk sektor proses industri dan penggunaan produk (*Industrial Processes and Product Use/IPPU*) menggunakan metodologi yang tercantum pada pedoman IPCC 2006. Tier 1 memerlukan data aktifitas berupa data agregat statistik produksi produk industri, jumlah penggunaan karbon, pelumas, lilin dan lain-lain secara aktual dalam skala nasional. Pengumpulan data berdasarkan pada jenis industri pada salah

satu proses atau keseluruhan proses pembuatan produk mengemisikan atau berpotensi mengemisikan gas rumah kaca.

## Perhitungan Sektor AFOLU (*Agriculture, Forestry and Land Use*)

### 1. Peternakan

Perhitungan emisi GRK dari sub sektor peternakan yang disajikan dalam inventarisasi emisi GRK ini menggunakan Tier 1 metode IPCC-2006. Penggunaan Tier yang lebih tinggi belum didukung adanya pembagian data aktivitas yang lebih lengkap berdasarkan jenis kelas umur dan faktor emisi lokal masing-masing jenis ternak. Estimasi emisi ternak ditentukan melalui perhitungan emisi dengan mengalikan suatu data aktivitas (misalnya, jumlah populasi) dengan faktor emisi lokal. Emisi metana dari fermentasi enteric dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{Emissions = EF_{(T)} * N_{(T)} * 10^6}$$

dimana

Emissions	=	Emisi metana dari fermentasi enterik (tonCH <sub>4</sub> /tahun)
EF <sub>(T)</sub>	=	Faktor emisi populasi jenis ternak tertentu (kg CH <sub>4</sub> /ekor/tahun)
N <sub>(T)</sub>	=	Jumlah populasi jenis/kategori ternak tertentu (ekor)
T	=	Jenis/kategori ternak

(IPCC, 2006)

Estimasi emisi metana dari pengelolaan kotoran ternak dilakukan dengan menggunakan persamaan dari IPCC (2006), sebagai berikut

$$CH_4\text{manure} = \sum_T \frac{(EF_t * N_t)}{10^6}$$

dimana

Emissions	=	Emisi metana dari fermentasi enterik (tonCH <sub>4</sub> /tahun)
-----------	---	--

$EF_{(T)}$  = Faktor emisi populasi jenis ternak tertentu (kg CH<sub>4</sub>/ekor/tahun)

$N_{(T)}$  = Jumlah populasi jenis/kategori ternak tertentu (ekor)

$T$  = Jenis/kategori ternak

Perhitungan emisi terhadap kategori Emisi N<sub>2</sub>O langsung dan tidak langsung juga menggunakan metodologi Tier 2 dengan data aktivitas populasi ternak berdasarkan kelas umur, bobot ternak lokal, namun dengan tambahan parameter mengenai sistem pengelolaan limbah ternak yang diterapkan di Indonesia. Informasi mengenai sistem pengelolaan limbah ini akan menentukan seberapa besar fraksi nitrogen yang terlepas ke atmosfer. Sejauh ini belum pernah dilakukan survey terhadap porsi penggunaan sistem pengelolaan limbah untuk masing-masing jenis ternak, untuk itu pada parameter ini dilakukan dengan penilaian pakar (*expert judgement*). Perhitungan emisi langsung N<sub>2</sub>O dari pengelolaan kotoran ternak dilakukan dengan persamaan berikut.

$$N_2O_{D(mm)} = \left[ \sum_S \left[ \sum_T (N_{(T)} * Nex_{(T)} * MS_{T,S} *) \right] * EF_{3(S)} \right] * \frac{44}{28}$$

Dimana

$N_2O_{D(mm)}$  = Emisi langsung N<sub>2</sub>O dari pengelolaan kotoran ternak, kg N<sub>2</sub>O yr<sup>-1</sup>

$N_{(T)}$  = Jumlah populasi jenis/kategori ternak tertentu, jumlah ternak

$Nex_{(T)}$  = Rata-rata tahunan ekskresi N per ekor jenis/kategori ternak, kg N ternak<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>

$MS_{(T,S)}$  = Fraksi dari total ekskresi nitrogen tahunan dari jenis ternak tertentu yang dikelola pada sistem pengelolaan kotoran ternak

$EF_{3(S)}$  = Faktor emisi langsung N<sub>2</sub>O dari sistem pengelolaan kotoran tertentu S, kgN<sub>2</sub>O-N/kgN

$S$  = Sistem pengelolaan kotoran ternak

- T = Jenis/kategori ternak  
44/28 = Konversi emisi (N<sub>2</sub>O)-N(mm) kedalam bentuk N<sub>2</sub>O(mm)

Emisi tidak langsung N<sub>2</sub>O dari penguapan N dalam bentuk ammonia (NH<sub>3</sub>) dan NO<sub>x</sub> (N<sub>2</sub>O<sub>G</sub>(mm)) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$N_2O_{G(mm)} = (N_{volatilization-MMS} * EF_4) * \frac{44}{28}$$

dimana

- N<sub>2</sub>O<sub>G</sub>(mm) = Emisi tidak langsung N<sub>2</sub>O akibat dari penguapan N dari pengelolaan kotoran ternak, kgN<sub>2</sub>O<sub>yr</sub>-1  
N<sub>volatilization-MMS</sub> = Jumlah kotoran ternak yang hilang akibat volatilisasi NH<sub>3</sub> dan NO<sub>x</sub>, kgN per tahun  
EF = Faktor emisi N<sub>2</sub>O dari deposisi atmosfer nitrogen di tanah dan permukaan air, kgN<sub>2</sub>O-N(kg NH<sub>3</sub>-N+Nox-N tervolatilisasi)-1; default value IPCC adalah 0.01 kg N<sub>2</sub>O-N (kgNH<sub>3</sub>-N + NO<sub>x</sub>-N tervolatilisasi)-1

## **2. Sumber Agregat dan Sumber Emisi Non-CO<sub>2</sub> pada Lahan**

Emisi GRK dari sumber agregat dan sumber emisi non-CO<sub>2</sub> pada lahan dalam inventarisasi emisi GRK diperkirakan menggunakan Tier 1 metode IPCC 2006 dengan nilai faktor emisi default dan metode Tier 2 khusus untuk kategori budidaya padi sawah.

Emisi dari aplikasi kapur pertanian dihitung dengan metodologi Tier 1 dengan data aktifitas berupa konsumsi penggunaan kapur untuk pertanian. Kapur pertanian (dolomit) umumnya digunakan pada perkebunan kelapa sawit, lahan kering masam dan tanah gambut. Data konsumsi kapur diduga dari luas areal tanam dan dosis rekomendasi yang digunakan karena data konsumsi kapur tidak tersedia. Dosis dolomit yang umum digunakan pada tanah sulfat masam adalah 2 ton/ha dan pada tanah gambut 0,5 ton/ha, yang biasanya diberikan 2 kali setahun pada musim hujan dan musim

kemarau. Petani lahan kering pada tanah masam umumnya tidak menggunakan kapur dalam budidaya tanaman karena kapur sangat sulit didapatkan, sehingga diasumsikan hanya digunakan pada perkebunan besar saja. Emisi CO<sub>2</sub> dari penambahan kapur karbonat kedalam tanah dapat diperkirakan dengan persamaan berikut.

$$CO_2\text{-Emission} = [(M_{\text{Limestones}} \times EF_{\text{Limestones}}) + (M_{\text{Dolomites}} \times EF_{\text{Dolomites}})]$$

dimana

- CO<sub>2</sub>-Emission = Emisi C tahunan dari aplikasi pengapuran ton C per tahun
- M = Jumlah kotoran ternak yang hilang akibat volatilisasi NH<sub>3</sub> dan NO<sub>x</sub>, kgN per tahun
- EF = Faktor emisi, ton C per (limestones atau dolomites). Default IPCC (Tier1) faktor emisi untuk limestone adalah 0.12 dan 0.13 untuk dolomite.

Emisi CO<sub>2</sub> aplikasi pupuk urea dihitung dengan metodologi Tier 1 dengan data aktivitas konsumsi pupuk urea pertanian. Jumlah pupuk urea yang digunakan dapat dihitung melalui dua pendekatan, yaitu berdasarkan data konsumsi urea nasional untuk sektor pertanian yang dikeluarkan oleh

$$CO_2\text{-C}_{\text{Emission}} = (M_{\text{Urea}} * EF_{\text{Urea}})$$

Asosiasi Produsen Pupuk Indonesia (APPI) atau berdasarkan luas tanam dan dosis rekomendasi. Pupuk urea umumnya digunakan dalam budidaya tanaman pangan, hortikultura dan perkebunan. Dalam menghitung jumlah pupuk tersebut digunakan beberapa asumsi agar jumlah pupuk urea yang dihitung sesuai dengan penerapan di lapangan. Emisi CO<sub>2</sub> dari penggunaan pupuk urea dihitung dengan persamaan berikut

dimana

- CO<sub>2</sub>-C Emission = Emisi C tahunan dari aplikasi pemupukan ton C per tahun

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



$M_{urea}$  = Jumlah atau berat dari Urea yang diaplikasikan, ton per tahun

$EF_{urea}$  = Faktor emisi, ton C per Urea

Emisi N<sub>2</sub>O dari tanah yang dikelola dihitung dari emisi langsung (direct N<sub>2</sub>O) dan tidak langsung (indirect N<sub>2</sub>O) dengan metodologi Tier 1 menggunakan faktor emisi default dari IPCC. Peningkatan N-tersedia dalam tanah meningkatkan proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang memproduksi N<sub>2</sub>O. Peningkatan N-tersedia dapat terjadi melalui penambahan pupuk yang mengandung N atau perubahan penggunaan lahan dan atau praktek-praktek pengelolaan yang menyebabkan mineralisasi N organik tanah. Persamaan untuk menduga emisi N<sub>2</sub>O langsung dari tanah yang dikelola adalah sebagaimana berikut ini

$$N_2O-Direct = N_2O-N_{N\ input} + N_2O-N_{OS} + N_2O-N_{PRP}$$

$N_2O-N_{N\ input}$  =  $\{[(FSN+FON+ FCR+FSOM) \times EF1] + [(FSN + FON + FCR + FSOM) \times EF11FR]\}$

$N_2O-N_{OS}$  =  $\{(FOS,CG,Temp \times EF2CG,Temp) + (FOS,CG,Trop \times EF2CG,Tro) + (FOS,F,Temp,NR \times E2F,Temp,NR) + (FOS,CG,Temp,NP \times EF2F,Temp,NP) + (FOS,F,Trop \times EF2F,Trop)\}$

$N_2O-N_{PRP}$  =  $[(FPRP,CPP \times EF3PRP,CPP) + (FPRP,SO \times EF3PRP,SO)]$

$N_2O-Direct$  = Emisi tahunan N<sub>2</sub>O langsung dari tanah yang dikelola, kg N<sub>2</sub>O-N per tahun

$N_2O-N_{N\ input}$  = Emisi tahunan N<sub>2</sub>O langsung dari input N ke tanah yang dikelola, kg N<sub>2</sub>O-N per tahun

$N_2O-N_{OS}$  = Emisi tahunan N<sub>2</sub>O langsung dari pengelolaan tanah organik, kg N<sub>2</sub>O-N per tahun

$N_2O-N_{PRP}$  = Emisi tahunan N<sub>2</sub>O langsung dari input urin atau kotoran ternak ke padang rumput atau penggembalaan, kg N<sub>2</sub>O-N per tahun

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



- $F_{SN}$  = Jumlah tahunan pupuk sintetis N yang diaplikasikan ke tanah, kg N per tahun
- $F_{ON}$  = Jumlah tahunan dari pupuk kandang, kompos, urin dan kotoran ternak, dan N organik lainnya yang diaplikasikan ke tanah, kg N per tahun
- $F_{CR}$  = Jumlah tahunan dari sisa tanaman (di atas tanah dan di bawah tanah), termasuk tanaman yang memfiksasi N dan dari pembaharuan hijauan atau padang rumput, kg N per tahun
- $F_{SOM}$  = Jumlah tahunan dari N pada tanah yang dimineralisasi, yang berhubungan dengan hilangnya bahan organik tanah akibat perubahan penggunaan lahan atau pengelolaan tanah mineral, kg N per tahun.
- $F_{PRP}$  = Jumlah tahunan dari input urin dan kotoran N yang dideposit di padang rumput atau padang penggembalaan, Kg N pertahun (CPP: Sapi, Unggas, dan Babi, dan SO: domba, dan ternak lain)
- $F_{OS}$  = Luas dari tanah organik yang dikelola/didrainase, ha (CG, F, Temp, Trop, NR dan NO adalah kependekakan dari Cropland dan Grassland, Forest Land, Temperate, Tropical, kaya hara [Nutrient Rich], dan miskin hara [Nutrient Poor])
- $EF_1$  = Faktor emisi untuk emisi  $N_2O$  dari input N untuk lahan kering,  $kgN_2O-N$  per (kg N input)
- $EF_{1FR}$  = Faktor emisi untuk emisi  $N_2O$  dari input N untuk sawah irigasi,  $kgN_2O-N$  per (kg N input)
- $EF_{2CG,F,Temp,Trop,R,P}$  = Faktor emisi untuk emisi  $N_2O$  dari tanah organik yang dikelola/didrainase input N untuk sawah irigasi,  $kgN_2O-N$  per (ha/tahun); (CG, F, Temp, Trop, R dan



P adalah kependekan dari *Crop Land* dan *Grass Land*, *Forest Land*, *Temperate*, *Tropical*, Kaya Hara (Nutrient Rich), dan Miskin Hara (*Nutrient Poor*)

EF3PRP = Faktor emisi untuk emisi N<sub>2</sub>O dari urin dan kotoran yang dideposit di padang rumput atau padang penggembalaan, kg N<sub>2</sub>O-N per (kg N input); (CPP: sapi, unggas dan babi, dan SO: domba, dan ternak lain).

Sedangkan persamaan untuk menduga emisi N<sub>2</sub>O tidak langsung dari tanah yang dikelola adalah

$$N_2O_{\text{-Indirect}} = (N_2O_{(\text{ATD})} - N + N_2O_{(\text{L.})} - N)$$

dimana

$N_2O_{\text{-Indirect}}$  = Emisi tahunan N<sub>2</sub>O langsung dari tanah yang dikelola, kg N<sub>2</sub>O- N per tahun

$N_2O_{(\text{ATD})} - N$  = [(FSN x FracGASF) + ((FON + FPRP) x FracGASM)] x EF4.

$N_2O_{(\text{L.})} - N$  = (FSN + FON + FPRP + FCR + FSOM) x FracLEACH-(H) x EF5.

$N_2O_{(\text{ATD})} - N$  = Jumlah tahunan N<sub>2</sub>O-N yang dihasilkan volatilisasi N ke atmosfer dari tanah yang dikelola, kg N<sub>2</sub>O-N per tahun

FSN = Jumlah tahunan pupuk N sintetis yang diberikan ke tanah, kg N per tahun.

FracGASF = Fraksi pupuk N sintetis yang bervolatisasi sebagai NH<sub>3</sub> dan NO<sub>x</sub>, kg N tervolatilisasi per kg N yang digunakan.

FON = Jumlah tahunan dari pupuk kandang, kompos, urin dan kotoran ternak, dan N organik lainnya yang diaplikasikan ke tanah, kg N per tahun

FPRP = Jumlah tahunan dari input urin dan kotoran N yang di deposit di padang rumput atau padang penggembalaan, Kg N per tahun

FracGASM = Fraksi pupuk organik N(FON) dan urin dan kotoran ternak yang dideposit ternak (FPRP) yang tervolatifikasi sebagai NH<sub>3</sub>

Emisi CH<sub>4</sub> dari budidaya padi sawah dihitung berdasarkan data aktivitas berupa luas lahan persawahan, jenis tanah pada lahan persawahan, dan sistem pengairan yang diterapkan. Metodologi yang digunakan untuk

$$CH_4_{\text{Rice}} = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} * t_{i,j,k} * A_{i,j,k} * 10^{-6})$$

kategori ini sudah termasuk ke dalam Tier 2 karena faktor emisi dan beberapa parameter yang digunakan sudah dikembangkan sendiri di Indonesia. Parameter lokal yang digunakan adalah faktor koreksi (*correction factor*) untuk jenis tanah, faktor skala (*scalling factor*) untuk tiap jenis sistem pengairan. Faktor emisi lokal telah dikembangkan untuk setiap varietas padi di Indonesia. Emisi CH<sub>4</sub> dihitung dengan mengalikan faktor emisi harian dengan lama budidaya padi sawah dan luas panen dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

Dimana

- CH<sub>4</sub> Rice = Emisi metan dari budidaya padi sawah, Gg CH<sub>4</sub> per tahun
- EF<sub>i, j, k</sub> = Faktor emisi untuk kondisi I, j, dan k; kg CH<sub>4</sub> per hari
- t<sub>i, j, k</sub> = Lama budidaya padi sawah untuk kondisi I, j, dan k; hari
- A<sub>i, j, k</sub> = Luas panen padi sawah untuk kondisi I, j, dan k; ha per tahun
- i, j, dan k = Mewakili ekosistem berbeda: i: rezim air, j: jenis dan jumlah pengembalian bahan organik tanah, dan k: kondisi lain di mana emisi CH<sub>4</sub> dari padi sawah dapat bervariasi

Emisi metana dari budidaya padi dihitung dengan menggunakan faktor emisi yang dirangkum dari nilai-nilai lokal sawah di Indonesia. Faktor emisi dari sawah Indonesia berkisar antara 0,67-79,86 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/musim dengan

nilai default rata-rata 160.9 kg CH<sub>4</sub>/ha/musim. Faktor skala tanah dimodifikasi, karena beberapa penelitian yang dilakukan di Indonesia menemukan bahwa sifat-sifat tanah yang berbeda diperoleh potensi yang berbeda produksi CH<sub>4</sub> (**Tabel 4**). Selain itu, faktor skala untuk rezim air dan varietas padi yang digunakan adalah faktor skala lokal (*country specific*) seperti disajikan pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

**Tabel 4. Revisi Faktor Skala Jenis Tanah Berbeda di Indonesia**

<b>Jenis Tanah</b>	<b><i>Scaling Factor Tanah Adjusted</i></b>
Alfisols	0,84 (0,32-1,59)
Andosols	1,02
Entisols	1,02 (0,94-1,09)
Histosols	2,39 (0,92-3,86)
Inceptisols	1,12 (1,0-1,23)
Mollisols	-
Oxisols	0,29 (0,1-0,47)
Ultisols	0,29
Vertisols	1,02 (0,94-1,09)

(KLHK, 2020)

**Tabel 5. Faktor skala yang disesuaikan dengan ekosistem padi dan tata air di Indonesia**

<b>Kategori</b>	<b>Sub Kategori</b>	<b>SF (IPCC Guidelines 1996)</b>	<b><i>Adjusted SF (based on current studies in Indonesia)</i></b>
Up land	None	0	

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



Low land	Irrigated	Continuously Flooded		1,0	1,00
		Intermittently Flooded	Single Aeration	0,5 (0,2-0,7)	0,46 (0,38-0,53)
			Multiple Aeration	0,2 (0,1-0,3)	
	Rainfed	Flood Prone		0,8 (0,5-1,0)	0,49 (0,19-0,75)
		Drought Prone		0,4 (0-0,5)	
	Deep Water	Water Depth 50-100 cm		0,8 (0,6-1,0)	
		Water Depth < 50 cm		0,6 (0,5-0,8)	

(KLHK, 2020)

**Tabel 6. Faktor Skala untuk varietas padi yang berbeda di Indonesia**

<b>No</b>	<b>Variety</b>	<b>Average emission (kg/ha/session)</b>	<b>Scalling Factor</b>
1	Gilirang	496,9	2,46
2	Aromatic	273,6	1,35
3	Tukad Unda	244,2	1,21
4	IR 72	223,2	1,10
5	Cisadane	204,6	1,01
6	IR 64*	202,3	1,00
7	Margasari	187,2	0,93
8	Cisantana	186,7	0,92
9	Tukad Petanu	157,8	0,78
10	Batang Anai	153,5	0,76
11	IR 36	147,5	0,73
12	Memberamo	146,2	0,72
13	Dodokan	145,6	0,72

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



14	Way Apoburu	145,5	0,72
15	Muncul	127,0	0,63
16	Tukad Balian	115,6	0,57
17	Cisanggarung	115,2	0,57
18	Ciherang	114,8	0,57
19	Limboto	99,2	0,49
20	Wayrareme	91,6	0,45
21	Maros	73,9	0,37
22	Mendawak	255	1,26
23	Mekongga	234	1,16
24	IR42	269	1,33
25	Fatmawati	245	1,21
26	BP360	215	1,06
27	BP205	196	0,97
28	Hipa4	197	0,98
29	Hipa6	219	1,08
30	Rokan	308	1,52
31	Hipa 5 Ceva	323	1,60
32	Hipa 6 Jete	301	1,49
33	Inpari 1	271	1,34
34	Inpari 6 Jete	272	1,34
35	Inpari 9 Elo	359	1,77
36	Banyuasin	584,8	2,49
37	Batanghari	517,8	2,20
38	Siak Raya	235,2	1,00
39	Sei Lalan	152,6	0,65
40	Punggur	144,2	0,61
41	Indragiri	141,1	0,60
42	Air Tenggulang	140,0	0,60
43	Martapura	125,7	0,53

*(KLHK, 2020)*

Berdasarkan berbagai data varietas yang digunakan oleh petani pada periode 2009-2011 (sekitar 70% dari total luas tanam padi), diketahui bahwa rata-rata terbobot skala faktor untuk varietas padi di sawah dengan irigasi terus menerus adalah 0,74. Nilai ini digunakan untuk memperkirakan emisi dari daerah irigasi dimana tidak ada informasi tentang varietas padi. Untuk sawah non-irigasi, SF untuk varietas padi akan sama dengan 1,0, karena pengaruh kondisi air pada pengurangan emisi metana akan jauh lebih dominan dibanding varietas. Dengan demikian pengaruh perubahan varietas dalam mengurangi emisi tidak akan signifikan di daerah non-irigasi, sehingga SF yang digunakan adalah 1,0 untuk daerah non-irigasi (Kementerian Lingkungan Hidup, 2010).

### **Perhitungan Sektor Pengelolaan Limbah**

Emisi GRK dari sektor limbah yang disajikan dalam laporan inventarisasi emisi GRK ini menggunakan Tier 2 metode IPCC-2006 pada kategori limbah padat domestik dan Tier 1 metode IPCC 2006 pada limbah padat domestik, limbah cair domestik dan limbah cair industri.

Tingkat emisi GRK di sektor limbah padat domestik bergantung pada fraksi jumlah sampah yang diolah, karakteristik dan tipe pengolahannya. Emisi GRK yang dihitung juga bergantung pada metode penghitungannya. Estimasi emisi GRK dari pengelolaan sampah di TPA menggunakan metode FOD (*First Order Decay*) yang merupakan perbaikan dari metode mass balance yang digunakan sebelumnya pada pelaporan Second National Communication (SNC). Selain itu nilai parameter lokal untuk komposisi sampah dan kandungan bahan kering (*dry matter content*) juga telah digunakan dalam estimasi penghitungan emisi menggunakan metode FOD. Perhitungan emisi metana dari sampah yang tertumpuk terbuka (open dumping) di TPA dilakukan berdasarkan simulasi terhadap jumlah sampah terbuang pada minimal 10 tahun terakhir.

Perhitungan emisi untuk pengelolaan limbah sanitasi akan ditentukan oleh faktor tipe fasilitas sanitasi yang dimiliki oleh masyarakat. Opsi tipe fasilitas

sanitasi adalah septic tank, cubluk, sewer dan sembarangan. Untuk variabel lain masih menggunakan default dari Pedoman IPCC.

Penghitungan emisi GRK pada kategori limbah cair industri menggunakan Tier 1 metode IPCC-2006. Meskipun menggunakan Tier 1, namun beberapa jenis industri sudah menggunakan parameter yang didapatkan dari industri secara langsung seperti debit air limbah, COD dan tipe pengolahan limbah yang digunakan.

### **E. Analisis kategori kunci (*key categories*)**

Terdapat beberapa pengkategorian dalam inventarisasi emisi. Ketika tujuan inventarisasi adalah memetakan sumber emisi dan menampilkan kontribusi emisi per masing masing kegiatan, maka pengkategorian berdasar kegiatan akan memudahkan. Pengkategorian ini membagi sumber emisi dalam tiga tipe yaitu :

1. Sumber Titik, merupakan sumber secara tunggal dapat berkontribusi emisi dalam jumlah besar
2. Sumber Area, merupakan sumber emisi yang biasanya memiliki frekwensi emisi kecil namun jumlah aktivitasnya banyak. Sehingga nilai emisinya akan menjadi signifikan apabila terakumulasi.
3. Sumber Bergerak, sumber emisi yang bersifat *mobile* atau bergerak menempuh jarak tertentu, baik di jalan raya (*on road*) maupun non jalan raya (*non road*).

Kegiatan inventarisasi GRK, tidak hanya yang dilaksanakan di Kota Surakarta, tidak memungkinkan untuk memetakan sumber dan besaran emisi. Hal ini disebabkan karena pendekatan koleksi data adalah top down, menggunakan data bersifat general atau umum yang telah berwujud rekapitulasi data aktivitas terhubung pada estimasi emisi. Distribusi masing-masing sumber emisi tidak menjadi bagian yang tercantum dalam rekapitulasi tersebut. Oleh sebab itu, untuk inventarisasi GRK, IPCC menentukan kategori kuncinya sendiri yang berhubungan dengan

pelaporan hasil. Kategori ini digunakan secara umum dalam pelaporan Inventarisasi GRK yaitu

1. Penggunaan energi

Pengadaan dan penggunaan energi, terkait dengan kegiatan produksi energi maupun penggunaan atau konsumsinya dalam aktivitas sehari-hari

2. Proses industri dan penggunaan produk dalam industri (IPPU)

Proses industri dan penggunaan produk, terkait dengan emisi dari suatu proses industri atau entropinya serta emisi akibat penggunaan produk tertentu dalam proses produksi, seperti penggunaan pelumas, wax, lilin dsb.

3. Pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan (AFOLU)

Kategori emisi terkait dengan emisi akibat aktivitas pertanian dan ikutannya (perkebunan, peternakan, pemupukan), emisi kehutanan (kebakaran lahan dan pengambilan kayu) serta emisi akibat fungsi lahan.

4. Pengelolaan limbah,

Emisi yang dihasilkan oleh pembuangan limbah (industri, rumah tangga maupun sampah padat) dan model pengelolaannya

Kategori kunci menjadi sumber yang harus diprioritaskan dalam pengelolaan emisi suatu wilayah. Kategori kunci juga bisa menggambarkan potensi rosot/serapa emisi lokal. Meskipun, kemampuan tersebut tentunya akan dominan dikontribusikan oleh ketersediaan vegetasi, khususnya dengan biomassa besar. Besar emisi pada kategori kunci akan menentukan total inventarisasi, pada aspek nilai mutlak, tren dan tingkat ketidakpastian.

Analisis kategori kunci akan diperlukan untuk :

1. Membantu mengidentifikasi sumber emisi yang perlu mendapatkan prioritas dalam pelaksanaan program perbaikan kualitas data aktivitas maupun faktor emisi. Upaya perbaikan difokuskan pada sumber yang sudah diidentifikasi sebagai kategori kunci
2. Membantu untuk mengidentifikasi sumber yang dalam perhitungan emisi perlu menggunakan metode dengan tingkat ketelitian (Tier) yang lebih tinggi



3. Membantu mengidentifikasi sumber mana yang perlu mendapatkan perhatian utama terkait dengan upaya pembuatan sistem penjamin dan pengendalian mutu data (QA/QC)

(Kementerian Lingkungan Hidup, 2011)

Terdapat dua pendekatan untuk melakukan analisis kategori kunci. Kedua pendekatan mengidentifikasi kategori kunci berdasarkan kontribusinya terhadap tingkat emisi nasional absolut dan tren dari emisi. Pendekatan pertama mengidentifikasi kategori kunci dengan menggunakan nilai batas emisi kumulatif. Kategori kunci adalah sumber emisi yang bersifat mutlak dan signifikan terhadap nilai kumulatif. Pendekatan kedua menentukan kategori kunci berdasarkan kontribusi terhadap nilai uncertainties. Pendekatan kedua membutuhkan ketersediaan data uncertainty dari emisi atau pada setiap parameter emisi. Pendekatan yang digunakan dalam penentuan kategori kunci adalah metode pertama,

Metode pertama terbagi dua yaitu untuk data inventarisasi dalam batasan temporal satu tahun menggunakan *Level Assessment* dan untuk data inventarisasi yang tersedia dalam time series menggunakan *Trend Assessment*. Inventarisasi emisi GRK Kota Surakarta hanya menyediakan data dalam satu tahun perhitungan sehingga digunakan pendekatan *Level Assessment* dengan mengaplikasikan formula sebagai berikut

$$L_{x,t} = |E_{x,t}| / \sum |E_{x,t}| \dots(4.1)$$

dengan

$L_{x,t}$  adalah rasio determinasi sektor emisi x terhadap total emisi t

$E_{x,t}$  adalah besaran emisi sektor x dalam keseluruhan emisi t

Kategori kunci merupakan kategori utama atau kelompok sektoral yang memiliki beban emisi mencapai 95% dari keseluruhan atau total emisi suatu wilayah atau suatu kategori utama IPCC.

## **F. Analisis emisi transportasi gateways Surakarta**

Analisis terhadap gateways Kota Surakarta dilakukan dengan pendekatan bottom up. Koleksi data memanfaatkan ketersediaan CCTV Dinas Perhubungan untuk memantau lalu lintas harian (LHR) secara penuh (24 jam). Pemantauan dilakukan pada 7 jalur masuk perkotaan yaitu : Kleco, Dawung, Klodran, Ringroad, Jurug, Makutho dan Jongke. Perhitungan LHR dilakukan secara penuh selama 24 jam dengan mengelompokkan tiga tipe kendaraan : sepeda motor, mobil penumpang dan high duty vehicle. Perhitungan emisi dilakukan menggunakan formula baku emisi dengan faktor emisi dan nilai ekonomis penggunaan bahan bakar berdasarkan pedoman EMEP/EEA Corinair 2019 Tier I.

## **G. Analisis dan interpretasi hasil**

Hasil dari pengumpulan data aktivitas pada tiap-tiap sumber emisi selanjutnya akan dihitung dengan perhitungan yang pada dasarnya bersumber pada formula dasar emisi untuk menentukan beban emisi yang dihasilkan. Perbedaan metode perhitungan akan bergantung pada tier perhitungan yang dipengaruhi oleh kompleksitas data. Perhitungan GRK secara khusus akan mengikuti panduan dari Petunjuk Teknis Inventarisasi Gas Rumah Kaca Kementerian Lingkungan Hidup RI (2011).

Nilai beban emisi selanjutnya akan ditampilkan berdasarkan kategori kunci, baik menurut IPCC maupun per pembagian sumbernya. Penyajian per-bagian pada laporan ini akan mengikuti determinasi emisi IPCC yaitu : pengadaan penggunaan energi; proses industri-penggunaan produk; pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan; serta pengelolaan limbah. Tampilan hasil dalam format tabel, pie chart, grafik (untuk tren) dan spasial (jika memungkinkan) untuk menunjukkan distribusi emisi. Untuk menunjukkan sajian hasil lebih mendetail, maka analisis sebaran emisi berdasarkan sumbernya juga akan ditampilkan.

Hasil inventarisasi GRK akan ditampilkan dalam 3 format yaitu pelaporan berbentuk dokumen, presentasi hasil akhir dengan melibatkan

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



stakeholder dan input data pada website signsmart. Pelaporan disusun berdasarkan format baku dokumen inventarisasi GRK sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No 73 Tahun 2017 pasal 12 ayat 2.

Presentasi hasil dilaksanakan sebagai paparan dan penyamaan visi dalam rangka mitigasi GRK bagi stakeholder, termasuk di dalamnya adalah pemilik data. Input hasil ke dalam website signsmart berfungsi sebagai pelaporan sekaligus transparansi informasi kepada publik. Hal ini dikarenakan website tersebut menyajikan data emisi nasional yang terbuka untuk diakses oleh masyarakat. Evaluasi terhadap efektivitas kebijakan, rencana dan program (KRP) mitigasi gas rumah kaca dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif. Pendekatan ini akan menarasikan antara KRP yang dilakukan dengan rasio peningkatan GRK pada periode 2018-2021.

### BAB III. HASIL INVENTARISASI

#### A. Tingkat, Status dan Kecenderungan Emisi Gas Rumah Kaca

Perhitungan emisi gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta mengaplikasikan metode perhitungan berbasis pada data aktivitas dan faktor emisi. Data aktivitas mewakili kegiatan berkarakter lokal yang memiliki potensi emisi signifikan. Koleksi data aktivitas dilaksanakan melalui pendekatan *top down approach*. Pendekatan koleksi data tersebut akan mengutamakan penggunaan data sekunder resmi dari pihak instansi pemerintah, maupun data-data kompeten lain dari instansi swasta, asosiasi maupun *expert judgement*.

Inventarisasi GRK tahun ini adalah keberlanjutan kegiatan rutin tahunan untuk menghitung GRK Kota Surakarta. Kegiatan ini telah berlangsung sejak 2018, namun sempat terhenti pada 2020 karena pandemi Covid-19. Cakupan area perhitungan GRK pada inventarisasi tahun ini bertambah karena adanya perubahan luas Kota Surakarta dari 44,04 km<sup>2</sup> menjadi 46,72 km<sup>2</sup>.

Kota Surakarta saat ini berkembang sebagai salah satu metropolitan baru di Pulau Jawa. Kota ini menjadi sentra layanan jasa dan perekonomian bagi kawasan hinterland-nya sebagai "Solo Raya" atau yang secara tradisional dikenal dengan "Subosukowonosraten". Letak Kota Surakarta tergolong strategis karena berada pada jalur lintas utama antar kota maupun provinsi. Hal ini menjadikan Surakarta sebagai kota transit yang sekaligus memberikan keuntungan bagi beberapa sektor perekonomian seperti perdagangan, jasa dan pariwisata.

Pemerintah kota mencanangkan arah pengembangan sebagai kota MICE (*Meeting, Incentives, Convention and Exhibition*) yang didesain untuk memperkuat pengembangan destinasi wisata lokal. Industri besar tidak banyak ditemukan di wilayah administratif Surakarta. Industri lebih

didominasi oleh kelompok menengah, kecil dan rakyat, terutama dari kegiatan tradisional batik.

Pembangunan berlangsung masif untuk mendukung Surakarta sebagai kota MICE. Pada tahun 2023, pemerintah Kota Surakarta mencanangkan 17 pembangunan prioritas di Kota Surakarta. Pembangunan tersebut meliputi Masjid Raya Sheikh Zayed, Islamic Centre, revitalisasi Ngarsopuro-Koridor Gatot Subroto, revitalisasi Taman Balekambang, Museum of Culture and Technology, Solo Safari, Sentra UKM Pasar Mebel Gilingan, PSEL Putri Cempo, Elevated Rail Simpang Tujuh Joglo, revitalisasi Pasar Jongke, revitalisasi gedung olahraga (GOR) Manahan, revitalisasi Solo Technopark, revitalisasi Lokananta, revitalisasi shelter Manahan, revitalisasi Pura Mangkunegaran, penataan kawasan kumuh Semanggi-Mojo serta revitalisasi Keraton Kasunanan. Mayoritas pembangunan diprediksikan menjadi episentrum aktivitas antropogenik baru. Hal tersebut akan berkonsekuensi pada kemunculan tekanan lingkungan tambahan pada wilayah urban Kota Surakarta.

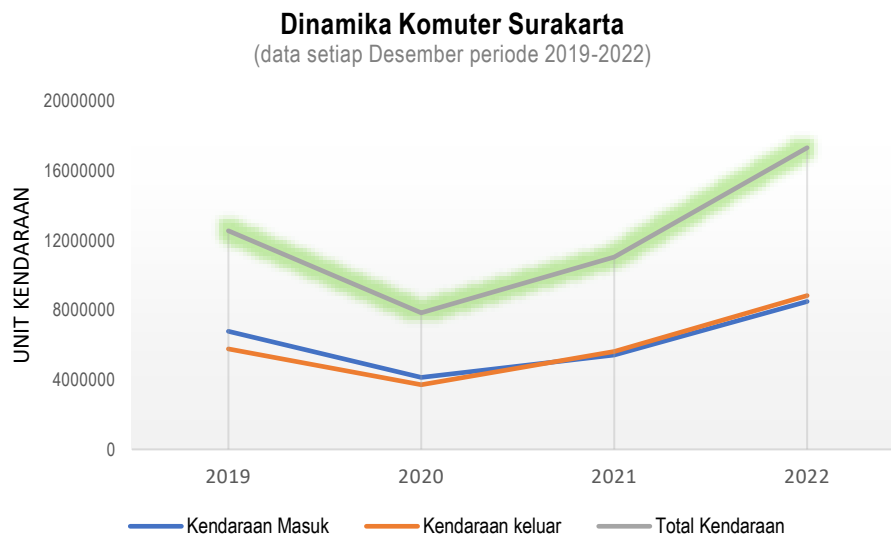
Pembangunan akan selaras dengan penyelenggaraan beragam event dengan pelibatan pengunjung besar. Kondisi ini didukung oleh berakhirnya pembatasan aktivitas akibat pandemi. Pelaksanaan event dijadikan upaya pemulihan ekonomi sekaligus menguatkan posisi Surakarta sebagai kota MICE. Pembangunan infrastruktur maupun pelaksanaan event sama-sama menjadi episentrum baru aktivitas antropogenik. Dampak kedua kegiatan tersebut adalah tekanan lingkungan yang akan mempengaruhi pada potensi peningkatan GRK. Peningkatan GRK tidak sebatas muncul dari transportasi, namun juga dari produksi sampah dan penggunaan bahan bakar memasak.

Kota Surakarta merupakan wujud perkotaan yang "settle" atau mapan ditinjau dari penggunaan ruang. Kawasan lindung maupun budidaya telah tersusun sedemikian rigid. Kondisi ini menyulitkan pengembangan lebih lanjut akibat keterbatasan ruang. Hal ini menyulitkan upaya mitigasi melalui penambahan penyerap karbon natural (vegetasi/RTH) konvensional maupun pembangunan infrastruktur fisik dalam mereduksi sumber atau

keluaran GRK. Pada sisi lain, sumber dan kontribusi antropogenik terhadap GRK Kota Surakarta meningkat secara signifikan.

Penciri antropogenik lokal akan berimbang pada emisi GRK. Kontribusi sektor transportasi mendominasi sebagai dampak aktivitas jalur transit dan komuter. Hasil inventarisasi emisi tahun 2022 mencoba melakukan perhitungan berbasis *bottom up* terhadap jalur gerbang yang menemukan sumbangsih GRK signifikan dari aktivitas transport. Hasil tersebut mampu menunjukkan *underestimate* pendekatan *top down* berbasis bahan bakar akibat karakter geografis maupun fungsi kota terhadap kawasan *hinterland*.

Karakter geografis dan fungsi kota terhadap kawasan *hinterland* menjelaskan kompleksitas pengendalian emisi transportasi Surakarta. Kota ini memiliki letak geografis yang strategis sebagai wilayah transit pada jalur lintas provinsi Pulau Jawa. Ketiadaan jalur lingkaran serta daya tarik wisata dan perdagangan mendorong pelintas untuk masuk dan bermobilisasi di kawasan pusat perkotaan.



**Gambar 9. Dinamika komuter Surakarta pendataan setiap bulan Desember pada periode 2019-2022 (sumber : pengolahan data Dishub Surakarta dalam Himawan, 2023)**

Kota Surakarta secara tradisi telah memiliki fungsi sebagai pusat layanan jasa dan perekonomian bagi kawasan *hinterland*. Perkembangan

pembangunan wilayah sekitar yang masih timpang dengan Surakarta menyebabkan ketergantungan bertahan hingga saat ini. Hal tersebut ditambah dengan penyusutan ketersediaan lahan pemukiman di wilayah administratif Surakarta yang mendorong perkembangan kawasan aglomerasi. Beragam kondisi tersebut menyebabkan peningkatan aktivitas komuter temporer Kota Surakarta. Aktivitas komuter menjadi kontributor utama emisi transportasi yang sekaligus bermakna sebagai faktor kunci dalam pengelolaan GRK Kota Surakarta.

Tren GRK dari sektor transportasi menjadi ancaman laten di masa depan. Kondisi tersebut didorong oleh kepemilikan peningkatan kepemilikan kendaraan. Paradoks penyediaan transportasi publik terhadap atensi dan peran serta masyarakat memperburuk kondisi tersebut. Rasio konversi energi maupun teknologi emisi belum mampu mengimbangi dinamika *demand* dan operasional moda transportasi.

Status penggunaan wilayah yang *settle* juga menyulitkan Kota Surakarta dalam perencanaan ruang. Hal ini akan membatasi upaya penataan transportasi. Layanan transportasi umum ideal akan bergantung pada penempatan koridor maupun halte pemberhentian. Konsep riset Liu et al (2022) menyebutkan bahwa penataan transportasi ideal adalah penempatan layanan publik pada kawasan pemukiman padat dan sentra kegiatan sosiekonomi. Pada sisi lain, inti masalah GRK Kota Surakarta adalah transportasi jalan raya. Imbas dari karakter *settle* tersebut adalah kesulitan mitigasi GRK transportasi jalan raya Kota Surakarta terutama dengan pendekatan linier.

Kota Surakarta memberikan respon untuk memitigasi GRK. Hal ini menjadi sisi positif diluar potensi peningkatan akibat pembangunan dan intensitas aktibitas antropogenik. Optimalisasi teknologi menjadi kata kunci dalam mitigasi tersebut. Respon tersebut antara lain pengembangan PSEL Putri Cempo. Fasilitas ini mampu mereduksi tumpukan sampah secara signifikan sekaligus produksi energi terbarukan. PSEL Putri Cempo akan mengurangi emisi metana (CH<sub>4</sub>) akibat landfill dengan proyeksi tumpukan

sampah akan habis 4-5 tahun ke depan. Respon lain adalah pengembangan transportasi massal berbasis *smart technology* pada Batik Solo Trans (BST), kereta komuter dan *feeder* untuk mengurangi ketergantungan masyarakat pada moda pribadi. Layanan BST telah menjangkau beberapa kabupaten di sekitar Surakarta dengan harapan dapat menekan jumlah kendaraan komuter.

Mayoritas faktor emisi dalam inventarisasi ini disitasi dari IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory* (2006). Faktor tersebut mencakup parameter karbondioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) dan nitrogen dioksida (N<sub>2</sub>O), menyesuaikan target keluaran inventarisasi. Beberapa faktor emisi telah disediakan secara lokal, khusus untuk wilayah Indonesia seperti pada konsumsi listrik. Faktor lain menggunakan perhitungan faktor emisi baru seperti yang diaplikasikan pada estimasi emisi GRK pertanian. Detail penggunaan faktor emisi ditampilkan pada deskripsi masing-masing kategori dan sub-kategori emisi dalam laporan ini.

## **1. Review Inventarisasi GRK Kota Surakarta Tahun 2022**

Inventarisasi GRK tahun 2022 merupakan sebuah *milestone post pandemic*. Inventarisasi tahun tersebut mendata emisi tahun 2021 dengan kondisi relaksasi pembatasan aktivitas diberlakukan seiring penurunan jumlah penderita dan penyebaran COVID-19. Hal tersebut dipandang menjadi titik balik dalam nilai GRK. Nilai GRK yang sedikit mengalami penurunan akibat pembatasan aktivitas, akan mencapai titik balik kenaikan pada tahun 2021.

Situasi pandemi mereda pada triwulan 2021. Kondisi tersebut memulihkan aktivitas pada intensitas normal, mendekati sebelum pandemi. Pembatasan aktivitas nyaris tidak lagi tampak dalam kegiatan harian masyarakat sehingga memulihkan kembali mobilitas masyarakat melalui transportasi serta beragam kegiatan antropogenik penyokong perekonomian dan jasa.



Estimasi GRK menunjukkan Kota Surakarta mengemisikan 3267628,61 tonCO<sub>2</sub>eq pada tahun 2021. Nilai tersebut mengalami peningkatan 5,74% dari estimasi tahun lalu. Tren masih menunjukkan peningkatan nilai dengan aspek positif pada rasio kenaikan yang mengalami penurunan (dari 101% pada periode 2018-2020).

**Tabel 8. Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC tahun inventarisasi 2022**

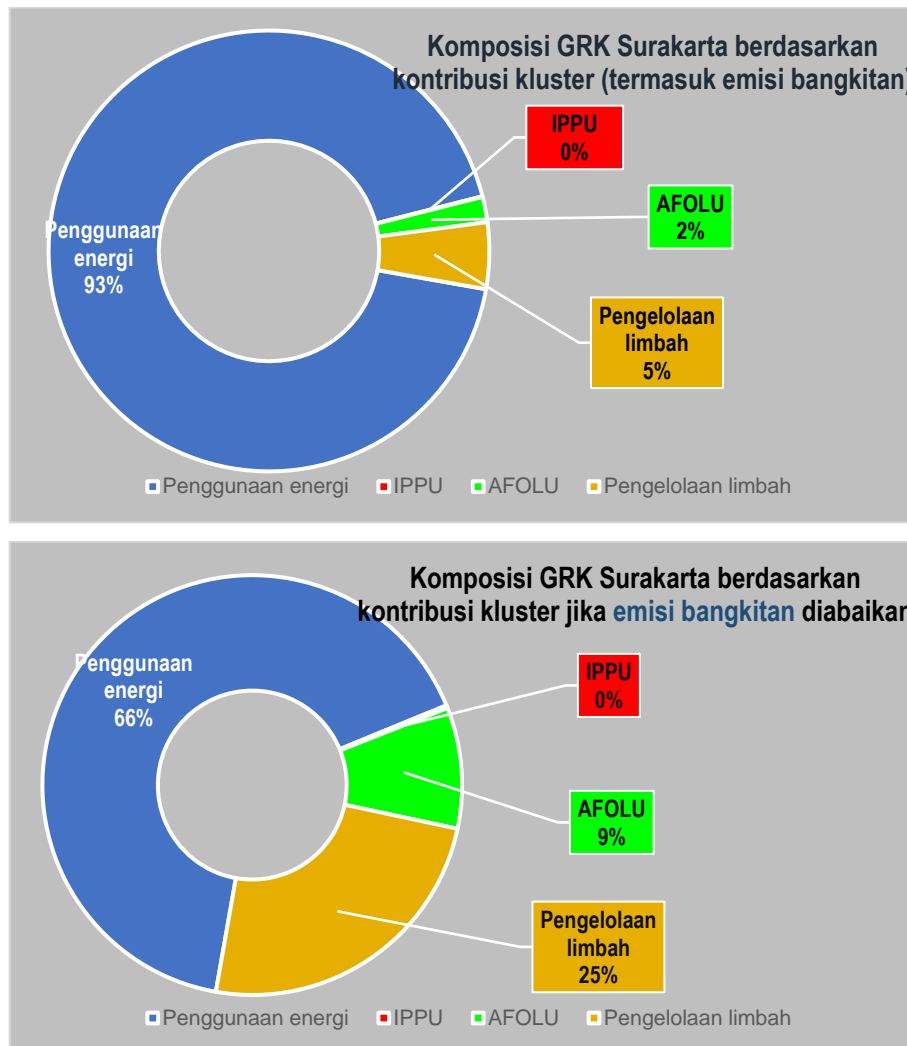
No	Kategori	Emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	Penggunaan energi	3039017.82	125.30	15.35	3046408.49
2	IPPU	2382.14	0.00	0.00	2382.14
3	AFOLU	59720.90	27.94	1.18	60673.65
4	Pengelolaan limbah	5.06	7339.97	16.05	159119.47
Total emisi GRK		3101125.93	7493.21	32.58	3268583.75

Sumber : perhitungan primer, 2022

Penggunaan energi masih menjadi kontributor GRK utama di Kota Surakarta dengan nilai mencapai 93% keseluruhan sumber (3,04 juta ton CO<sub>2</sub>eq). Kontribusi kluster penggunaan energi masih setara dengan kondisi tahun sebelumnya. Nilai tersebut diperoleh dengan turut memperhitungkan emisi bangkitan pada penggunaan listrik. Nilai GRK penggunaan energi dengan memasukkan bangkitan listrik menutup nilai-nilai kluster lain. Pada peringkat kedua adalah pengelolaan limbah yang berkontribusi pada 5% GRK kota.

Nilai kontribusi GRK pada masing masing kluster akan berbeda ketika melepas emisi bangkitan dari hitungan. Emisi bangkitan merupakan tipikal emisi dengan masyarakat kota Surakarta hanya mengaktifkan *combustion* yang berada pada lokasi pembangkit. Hal ini dikarenakan ketiadaan pembangkit listrik di wilayah administratif Surakarta. Emisi GRK Kota Surakarta dengan mengabaikan emisi bangkitan masih dominan oleh kluster penggunaan energi namun dengan proporsi lebih kecil yaitu 66%. Nilai emisi total juga mengalami penurunan signifikan menjadi "hanya" 652028,31 tonCO<sub>2</sub>eq. Eliminasi bangkitan memunculkan proporsi lebih

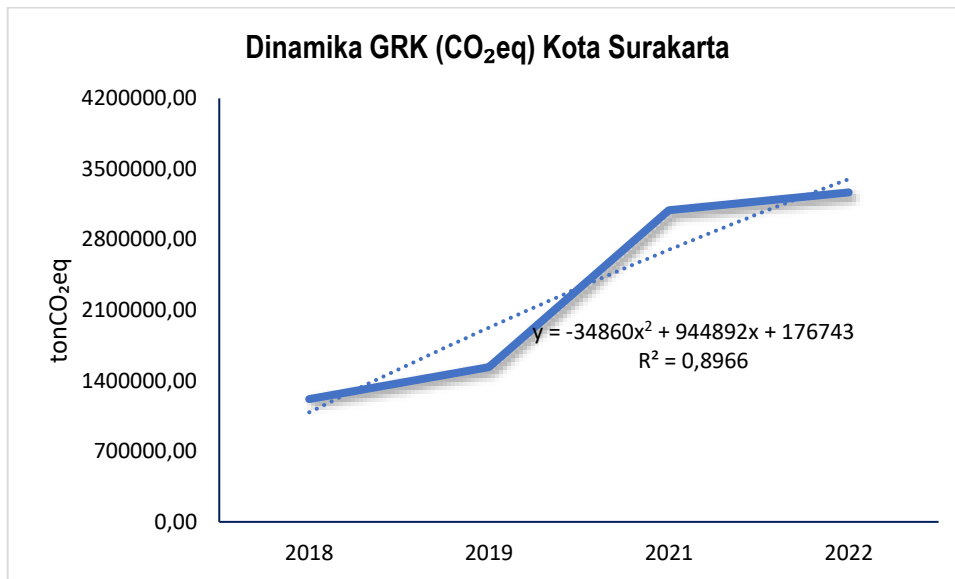
besar dari kluster lain secara berturutan adalah pengelolaan limbah (25%) dan AFOLU (9%).



**Gambar 10. Kontribusi kluster GRK pada inventarisasi Kota Surakarta tahun 2022**

Estimasi emisi pada periode 2018-2022 menunjukkan tren yang meningkat mengikuti pola polinomial dengan  $r^2 : 0,8966$ , mengindikasikan kenaikan masih signifikan. Lesatan teridentifikasi terjadi pada fase sebelum pandemi. Pandemi mampu sedikit mengerem GRK karena pembatasan emisi maupun kondisi sosioekonomi global maupun lokal. Hal ini terbukti dengan penurunan rasio peningkatan pada inventarisasi 2022 (5,73%). Secara umum, tanpa adanya pandemi, upaya mitigasi adaptasi dalam pengendalian GRK belum dapat dikatakan efektif. Pandemi memberikan dampak temporer

pada penurunan GRK yang segera menghadapi ujian sesungguhnya pasca pandemi dan normalisasi seluruh aktivitas antropogenik.



**Gambar 11. Dinamika gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta pada periode inventarisasi 2018-2022**

## 2. Hasil Inventarisasi GRK Kota Surakarta tahun 2023

### a. Deskripsi Umum

Inventarisasi emisi tahun 2023 menggunakan pendataan tahun 2022. Tahun 2022 merupakan masa ketika aktivitas antropogenik berangsur-angsur pulih menuju normal pasca pandemi. Aktivitas perekonomian maupun layanan jasa kembali berlangsung secara normal dengan tatap muka. Beragam aktivitas yang melibatkan keikutsertaan massa dalam jumlah besar kembali dapat diselenggarakan. Hal tersebut bermakna bahwa mobilitas masyarakat kembali berlangsung dalam intensitas tinggi. Operasional beragam moda transportasi akan menjadi trigger bagi peningkatan emisi GRK di Kota Surakarta.

Inventarisasi tahun 2023 berbeda dengan tahun sebelumnya. Beberapa koreksi dilakukan terhadap sumber emisi mengikuti pada perubahan kondisi Kota Surakarta sekaligus sebagai penanda tahapan inventarisasi memasuki periode baru. Inventarisasi GRK 2023 merupakan

tahun keenam perhitungan GRK Kota Surakarta. Pemerintah Kota Surakarta telah melaksanakan evaluasi terhadap rencana aksi daerah (RAD) GRK 2018-2023 yang menunjukkan tren GRK masih terus meningkat melampaui target dicanangkan (jika memasukkan emisi bangkitan listrik). Hasil inventarisasi GRK tahun 2023 dapat menjadi *baseline* (dasar) bagi penyusunan RAD GRK dan RAD Perubahan Iklim periode berikutnya.

Inventarisasi GRK Kota Surakarta tahun 2023 memberikan koreksi pada penggunaan data bangkitan listrik dan penghapusan GRK pertanian. Bangkitan (konsumsi) listrik menggunakan data lebih *rigid* dari narasumber ahli PLN Surakarta. Data tersebut telah menyediakan nilai konsumsi listrik yang telah terpilah secara khusus untuk wilayah administratif Kota Surakarta. Data sebelumnya menunjukkan konsumsi listrik yang mencakup keseluruhan layanan PLN Surakarta dengan sebagian merupakan hasil bangkitan di luar wilayah administratif Kota Surakarta. Emisi GRK pertanian dihapus dari perhitungan tahun 2023 dengan pertimbangan bahwa sawah lestari telah dihapus dan luasan lahan yang tidak signifikan (sangat sempit). Perubahan pada kedua sumber GRK tersebut berpotensi menurunkan nilai emisi pada tahun 2023.

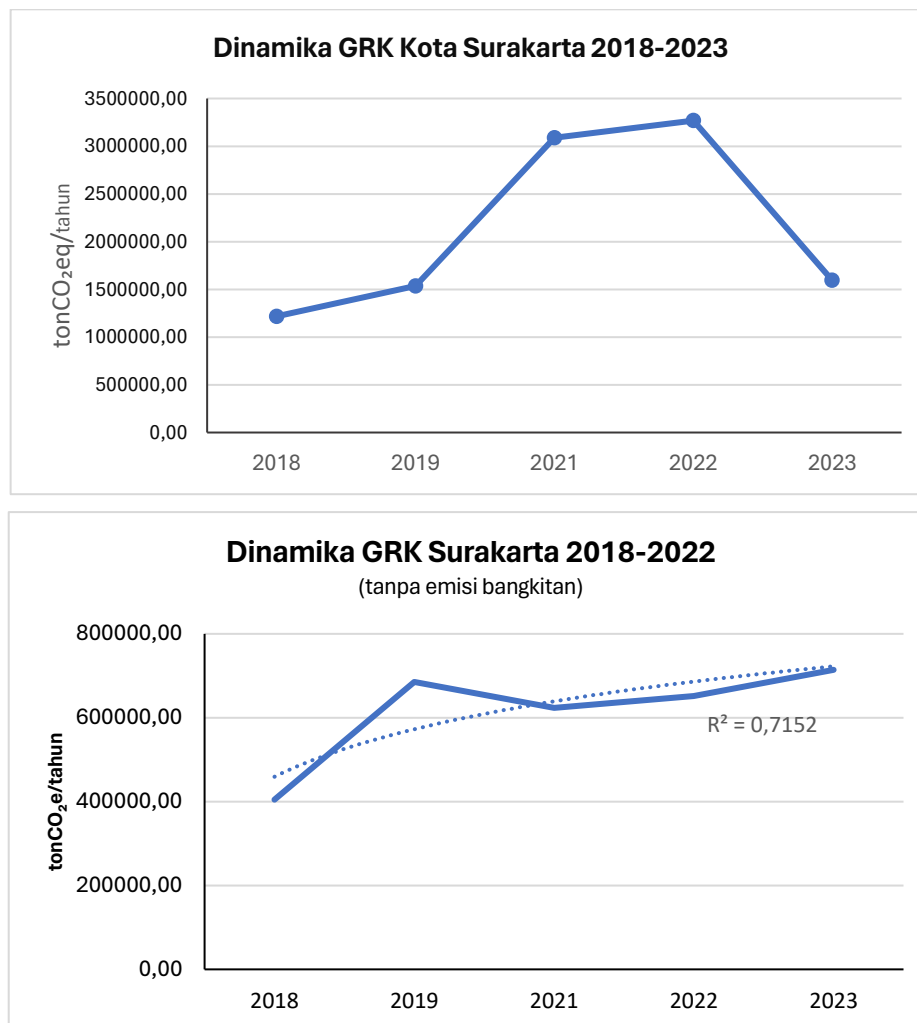
**Tabel 9. Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC tahun inventarisasi 2023**

No	Kategori	Emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	Penggunaan energi	1344715.32	136.95	16.34	1352655.58
2	IPPU	9828.28	0.00	0.00	9828.28
3	AFOLU	59657.00	19.98	0.42	60207.24
4	Pengelolaan limbah	10.24	7429.31	56.26	173466.72
Total emisi GRK		1414210.85	7586.24	73.02	1596157.83

Sumber : pengolahan data sekunder (2023)

Estimasi GRK menunjukkan Kota Surakarta mengemisikan 1596157,83 tonCO<sub>2</sub>eq pada tahun 2022. Nilai tersebut mengalami penurunan 51,17 % dari estimasi tahun lalu. Penurunan tersebut telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya disebabkan oleh perubahan data pada konsumsi listrik dan pertanian. Nilai bangkitan listrik yang kerap muncul

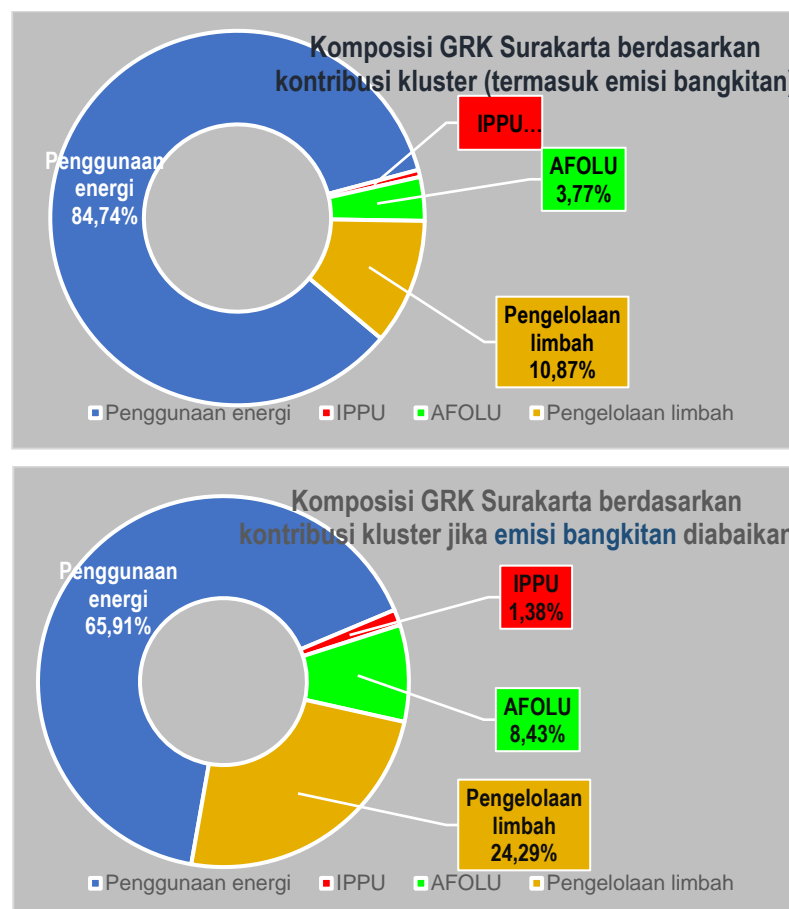
secara dominan menjadi terkoreksi sehingga memunculkan hasil hitung emisi lebih rendah. Hasil lebih “fair” ditunjukkan oleh nilai emisi dengan menghapus bangkitan listrik yang menunjukkan nilai 714204.86 tonCO<sub>2</sub>e/tahun. Tren GRK lokal (non bangkitan) menunjukkan peningkatan nilai sebesar 9,54%. Peningkatan GRK menunjukkan *rebound effect* pasca pandemi dengan kondisi rasio peningkatan nilai yang bertambah dari 4,64% (2020-2021) menjadi 9,54% (2021-2022).



**Gambar 12. Dinamika GRK Kota Surakarta dengan memasukkan nilai bangkitan listrik (atas) dan nilai “fair” tanpa bangkitan listrik (bawah)**

Hasil inventarisasi sektoral IPCC menunjukkan pola serupa dengan tahun-tahun sebelumnya. Penggunaan energi masih menjadi kontributor GRK utama di Kota Surakarta dengan nilai mencapai 84,74% (jika

memasukkan emisi bangkitan listrik) dan 65,91% (tanpa emisi bangkitan listrik) dari keseluruhan sumber (1,59 juta ton CO<sub>2</sub>eq). Kontribusi kluster penggunaan energi relatif setara dengan kondisi tahun sebelumnya jika ditinjau secara fair dengan menghapus bangkitan listrik. Nilai GRK penggunaan energi menutup nilai-nilai kluster lain. Hal ini mengarahkan prioritas skala tinggi harus difokuskan pada kluster ini untuk dapat mereduksi GRK secara efektif. Pada peringkat kedua adalah pengelolaan limbah yang berkontribusi pada 10,87% GRK kota atau 24,29% jika tanpa memasukkan bangkitan listrik.



**Gambar 13. Kontribusi sektoral GRK Kota Surakarta dengan memasukkan nilai bangkitan listrik (atas) dan tanpa bangkitan listrik (bawah)**

Penilaian terhadap GRK Kota Surakarta lebih adil dengan mengeliminasi sumber bangkitan listrik. Alasan penilaian tersebut adalah ketiadaan pembangkit listrik di wilayah administratif Kota Surakarta.

Artinya, emisi dari listrik merupakan bangkitan yang tidak berdampak langsung pada lokasi inventarisasi (Kota Surakarta). Pengelolaan konsumsi listrik tetap direkomendasikan sebagai bagian keikutsertaan dalam menekan emisi pada lokasi pembangkit dan mitigasi dampak global.

#### **b. Pengadaan dan Penggunaan Energi**

Energi merupakan kebutuhan utama pada kehidupan karena setiap aktivitas, kerja, kreasi dan produksi akan memanfaatkan energi dan melibatkan konversi energi di dalamnya. Rasio aktivitas akan meningkat selaras dengan peningkatan kebutuhan manusia dan beragam upaya pemenuhan kebutuhan tersebut dengan dipicu oleh pertumbuhan populasi. Faktor tekanan terhadap emisi kategori pengadaan dan penggunaan energi mencakup : (1) ketergantungan pada penggunaan bahan bakar fosil, (2) keterbatasan pilihan energi pengganti dan (3) budaya lingkungan masyarakat.

Penggunaan energi akan memunculkan entropi (Hukum Termodinamika II). Entropi ini berwujud sebagai pencemaran pada lingkungan. Kondisi ini menjadikan penggunaan dan pengubahan energi menjadi pemicu utama bagi pencemaran, termasuk pencemaran udara. Pada dunia modern dan masyarakat perkotaan, biasanya penggunaan energi akan terpusat pada beberapa aktivitas seperti transportasi, industri dan komersial. Penggunaan energi dalam hal ini berwujud sebagai bahan bakar atau penggerak mesin, didominasi oleh dampak energi yang dibakar untuk aktivitas tertentu.

Konteks inventarisasi GRK, yang dimaksud pembakaran bahan bakar adalah oksidasi bahan bakar secara sengaja dalam suatu alat dengan tujuan menyediakan panas atau kerja mekanik pada suatu proses (Kementerian Lingkungan Hidup, 2012). Artinya adalah inventarisasi ditinjau dari pemahaman emisi umum dilakukan pada emisi yang dihasilkan pada proses stokiometris yang melibatkan mesin-mesin atau metode mekanis buatan

manusia. Emisi yang dihasilkan secara alami berupa proses enzimatik tidak disertakan dalam perhitungan.

Referensi dalam IPCC Guidelines (2006) menjelaskan bahwa pada sebuah emisi pembakaran energi, terdapat tiga tipe gas utama yang dihasilkan yaitu CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O. Gas emisi yang dominan dihasilkan tentunya berupa karbondioksida (CO<sub>2</sub>). Setiap pembakaran sempurna pada karbon akan menghasilkan karbondioksida. Emisi karbondioksida tidak banyak dipengaruhi oleh teknologi pembakaran. Karakter yang berbeda dengan emisi CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O yang signifikan dipengaruhi oleh teknologi pembakaran yang diaplikasikan. Gas non karbondioksida terkadang ikut dihasilkan, namun dalam jumlah yang kecil dan nilainya jauh di bawah karbondioksida. Oleh sebab itu, analisis terhadap emisi GRK dari kategori pembakaran akan lebih tepat guna jika dilakukan berdasarkan jumlah atau konsentrasi karbondioksida yang diemisikan.

Menurut IPCC Guidelines (2006) yang disitasi oleh Pedoman Inventarisasi Emisi GRK Kementerian Lingkungan Hidup (2012), sumber emisi pada inventarisasi GRK dibagi 3 yaitu :

- (1). Emisi pembakaran bahan bakar (combustive), telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya
- (2). Emisi fugitive kegiatan produksi dan penyediaan bahan bakar. Merupakan emisi GRK yang secara tidak sengaja terlepas pada kegiatan produksi dan penyediaan energi di lapangan. Umumnya terjadi pada kegiatan pertambangan energi, produksi dan pengolahan bahan bakar dan penyaluran melalui pipa-pipa khusus.
- (3). Emisi dari pengangkutan dan injeksi CO<sub>2</sub> pada kegiatan geologi. Kegiatan ini belum ada dan belum akan diadakan dalam waktu dekat di wilayah Indonesia, sehingga emisinya dapat diabaikan.

Melalui ketiga kategori tersebut akan dapat dispesifikasikan lagi ke dalam aktivitas masyarakat yang lebih umum dan mudah dijelaskan.



Profil aktivitas sosial ekonomi masyarakat Surakarta menjadi elemen penting dalam menggambarkan konsumsi energi lokal. Masyarakat Surakarta merupakan komunitas yang sebagian besar menggantungkan kehidupan perekonomiannya pada sektor perdagangan, jasa dan pariwisata. Salah satu ciri khas wilayah Kota Surakarta adalah statusnya sebagai pusat kegiatan perekonomian dan pelayanan bagi kawasan hinterland di sekitarnya. Hal tersebut menjadi penanda penting bagi analisis atau kajian emisi lokal sebab menimbulkan dampak signifikan pada keseluruhan nilai emisi. Sebagai pusat kegiatan ekonomi sekaligus pelayanan jasa wilayah hinterland yang dikenal sebagai "Subosukowonosraten (Surakarta, Boyolali, Sukoharjo, Wonogiri, Sragen dan Klaten)" atau Greater Solo memberikan konsekuensi pada intensitas komuter (penglajo) yang tinggi. Dinas Perhubungan, Komunikasi dan Informasi Surakarta pada 2014 menyatakan adanya penambahan beban lalu lintas lebih dari tiga kali lipat pada jam-jam kerja yang dipastikan selaras dengan penambahan beban emisi pada waktu tersebut.

Kondisi tersebut diperburuk dengan lokasi mayoritas pemukiman pekerja lokal yang berada di luar wilayah administratif, sehingga menambah trayek perjalanan yang berimbas pada peningkatan konsumsi bahan bakar transportasi. Pertumbuhan kawasan hinterland dapat dikatakan belum dapat setara dengan Surakarta sehingga daya tarik ekonomi dan jasa kota ini terhadap populasi sekitar masih akan bertahan pada periode yang panjang. Penyediaan transportasi massal, saat ini telah berlangsung integrasi mobilisasi komuter menuju maupun dari Surakarta. Namun, integrasi tersebut masih terbatas pada trayek layanan fasilitas publik terutama interkoneksi antarmoda (trayek bandara, stasiun atau terminal) dan minat masyarakat untuk memanfaatkan fasilitas transportasi publik yang rendah.

Posisi strategis Kota Surakarta terhadap Greater Solo memunculkan kawasan aglomerasi (wilayah peri urban) sebagai perluasan perkotaan. Wilayah perbatasan seperti Colomadu, Jaten (Kabupaten

Karanganyar), Grogol, Gentan (Sukoharjo) dan Ngemplak (Boyolali) telah menjadi wilayah urban baru sebagai pendukung kawasan kota Surakarta. Wilayah tersebut berperan sebagai kawasan pemukiman baru serta penyedia fasilitas jasa dan perdagangan yang tidak lagi terlokasikan di wilayah administratif Surakarta. Kondisi tersebut pada akhirnya mendorong peningkatan mobilitas antar wilayah.

Kota Surakarta memegang peranan penting sebagai wilayah transit antar provinsi. Lokasi kota cukup strategis dalam jaringan jalan utama lintas Pulau Jawa serta didukung oleh daya tarik pariwisata dan perdagangan yang kuat. Kota Surakarta saat ini belum memiliki infrastruktur jalur lingkaran untuk mengalihkan arus kendaraan agar tidak melintasi pusat perkotaan.

Letak strategis Kota Surakarta secara ekonomis sebagai pusat kegiatan Subosukawonosraten dan jalur transit memberikan potensi ekonomi yang besar. Pemerintah berupaya memanfaatkan potensi ekonomi melalui penancangan sebagai kota MICE. Upaya optimalisasi potensi ekonomi berkonsekuensi pada tekanan lingkungan yang meningkat. Salah satu tekanan lingkungan yang secara signifikan dapat dirasakan adalah kepadatan lalu lintas. Penambahan jumlah kendaraan akibat aktivitas komuter, transit maupun event dapat meningkatkan GRK sektor transportasi.

Kajian pada tahun 2023 menambahkan pendekatan hitung berbasis pantauan lalu lintas harian rata-rata (LHR). Hitungan tersebut berperan sebagai pembanding bagi pendekatan hitung standar berbasis penjualan bahan bakar. Hasil hitungan dapat menjadi pembanding serta gambaran riil masalah GRK, terutama aktivitas komuter. Perhitungan berbasis LHR diasumsikan memberi nilai GRK transportasi dengan *uncertainties* lebih kecil.

Kota Surakarta hanya memiliki sedikit industri skala besar. Sebagian hanya kantor-kantor perwakilan/distribusi sehingga tanpa aktivitas industri. Kota Surakarta lebih didominasi oleh industri kecil dan rumah tangga. Salah

satu yang dominan adalah kelompok industri tekstil tradisional (batik) dan produk-produk penyokong kegiatan jasa pariwisata.

Kota Surakarta tidak memiliki pembangkit energi dalam wilayah administratifnya, sehingga emisi sektor energi secara keseluruhan dikontribusikan oleh penggunaan energi. Secara mendetail, sub kegiatan pada sektor penggunaan energi di Kota Surakarta meliputi : transportasi (jalan raya dan kereta api), industri, perdagangan , domestik dan konsumsi listrik. Berikut adalah hasil estimasi emisi penggunaan energi di Kota Surakarta.

**Tabel 10. Hasil inventarisasi GRK kluster pengadaan dan penggunaan energi Kota Surakarta tahun 2023**

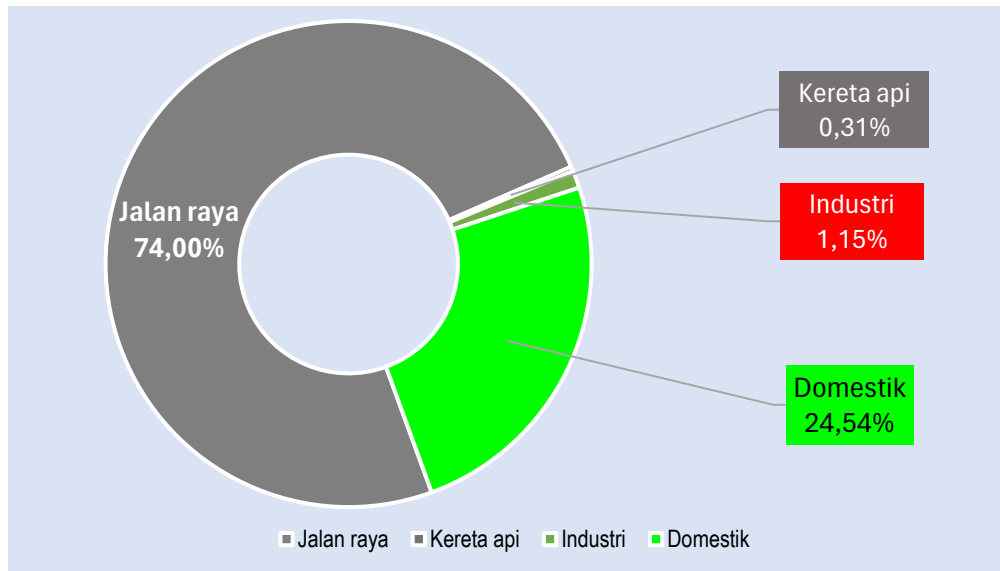
No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	
1	Transportasi				
a	Jalan raya	340727.00	125.00	16.00	348312.00
b	Kereta api	1440.97	0.08	0.08	1466.35
2	Industri	5416.90	0.25	0.04	5435.85
3	Domestik	115177.48	11.63	0.22	115488.41
4	Listrik	881952.97	0.00	0.00	881952.97
<b>Sum Total Energy</b>		<b>1344715.32</b>	<b>136.95</b>	<b>16.34</b>	<b>1352655.58</b>

Sumber : pengolahan data sekunder (2023)

Total emisi GRK yang dikontribusikan oleh kluster pengadaan dan penggunaan energi pada tahun 2023 adalah 1352655,58 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Konsumsi listrik dominan memberi kontribusi pada kluster pengadaan dan penggunaan energi dengan persentase mencapai 65,59%. Tinjauan tren berdasarkan nilai total GRK tahunan yang memasukkan bangkitan listrik menunjukkan penurunan dibandingkan inventarisasi tahun sebelumnya (-56%). Hal tersebut dikarenakan koreksi dalam data konsumsi listrik. Koreksi tersebut sekaligus menurunkan kontribusi bangkitan listrik terhadap keseluruhan GRK sektor penggunaan dan pengadaan energi dibandingkan tahun sebelumnya.

Total emisi kluster pengadaan dan penggunaan energi tanpa memperhitungkan bangkitan listrik mencapai 470702,61 tonCO<sub>2</sub>e. Nilai ini mengalami peningkatan 9,5% dibandingkan tahun sebelumnya.

Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa terdapat peningkatan aktivitas yang memberikan dampak pada kenaikan GRK lokal (GRK yang secara langsung diemisikan). Rasio peningkatan tersebut lebih tinggi dibandingkan tahun sebelumnya sebagai penanda *rebound effect* pasca pandemi masih berlangsung.



**Gambar 14. Kontribusi aktivitas pada kluster GRK pengadaan dan penggunaan energi Kota Surakarta tanpa bangkitan listrik**

Kontributor GRK pada kluster pengadaan dan penggunaan energi dengan mengeliminasi konsumsi listrik memunculkan dominasi aktivitas transportasi jalan raya. Aktivitas transportasi jalan raya menyumbang 74% GRK pada kluster pengadaan dan penggunaan energi. Nilai tersebut meningkat 2,07% dari inventarisasi sebelumnya yang menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar transportasi mengalami peningkatan. Hal tersebut dikarenakan basis perhitungan GRK transportasi top down IPCC adalah penggunaan bahan bakar. Gas rumah kaca domestik menjadi kontributor kedua dengan persentase 24,54%. Nilai tersebut mengalami penurunan 2,92% yang disebabkan oleh pemulihan aktivitas pasca pandemi. Pemulihan tersebut membuat masyarakat Kota Surakarta kembali pada kebiasaan tradisional untuk lebih banyak kuliner di luar rumah. Sektor industri yang kembali aktif beroperasi secara optimal menyumbang GRK sektor pengadaan dan penggunaan energi sebesar 1,15%. Sisa GRK pada

sektor ini dikontribusikan oleh penggunaan bahan bakar kereta api yang melintasi wilayah administratif Kota Surakarta.

Kenaikan dan penurunan nilai kontribusi aktivitas terhadap keseluruhan GRK kluster pengadaan dan penggunaan energi dipengaruhi oleh normalisasi aktivitas pasca pandemi. Tahun 2022 kondisi pandemi semakin membaik dan aktivitas harian kembali dilakukan secara normal. Secara perlahan, aktivitas antropogenik tercatat semakin mengalami peningkatan intensitas pada triwulan akhir tahun 2022. Kegiatan perkantoran dan pendidikan telah kembali pada sistem tatap muka. Aktivitas perdagangan dan pariwisata pun perlahan kembali menuju intensitas normal. Hal tersebut ditandai dengan peningkatan keramaian pada pasar tradisional maupun modern serta pelaksanaan beragam event berskala nasional hingga internasional di Kota Surakarta. Situasi ini mengembalikan mobilitas masyarakat yang berimbas pada peningkatan emisi transportasi jalan raya. Nilai kontribusi transportasi jalan raya diprediksikan akan terus meningkat seiring normalisasi seluruh kegiatan pada tahun berikutnya.

### **(1) Sektor: Transportasi**

Penelitian Tiseo et al (2022) menjelaskan bahwa transportasi terus mengalami perkembangan signifikan sebagai kontributor GRK global. Penelitian tersebut menunjukkan kontribusi sektor transportasi mencapai 20,7%. Kontribusi GRK transportasi meningkat dibandingkan laporan AR5 tahun 2014 yang masih berada pada kisaran 14%. Pandangan Tiseo et al (2022) mengarahkan kepemilikan dan operasional moda kendaraan bermotor untuk mobilitas jalan raya sebagai faktor driver peningkatan tersebut. Moda transportasi jalan raya menyumbang hingga 75% GRK transportasi terutama karena dominasi kendaraan pribadi.

Perkembangan perkotaan dan ekspansi wilayah urban menjadi faktor pressure kenaikan GRK transportasi. Pertumbuhan populasi penduduk mendorong penyediaan ruang baru untuk mewadahi aktivitas antropogenik

tambahan (pemukiman, jasa maupun perekonomian). Hal tersebut difasilitasi dengan pembangunan aksesibilitas untuk mendukung mobilitas masyarakat sekaligus pengembangan bagi kawasan urban baru. Jalan-jalar baru dan beragam infrastruktur mobilitas mendorong masyarakat meningkatkan intensitas penggunaan moda pribadi. Kondisi tersebut terutama terjadi ketika jarak antara pemukiman dengan pusat kegiatan ekonomi jauh dan transportasi publik terbatas atau belum menjadi pola budaya masyarakat lokal.

Ekspansi ruang perkotaan membentuk jaringan baru antar wilayah administratif sebagai "kawasan *greater/terpadu*". Kota lebih maju menjadi daya tarik bagi masyarakat wilayah sekitarnya (hinterland) dan memunculkan masalah komuter. Peningkatan status jalan, pembangunan jalan baru hingga kemunculan interaksi imbal balik antar wilayah (logistik maupun manusia) memunculkan kawasan-kawasan transit. Perkembangan tersebut memunculkan pola GRK transportasi baru yang lebih meluas dibandingkan konsep konsentrasi lama. Penelitian Himawan (2023) di Kota Surakarta menunjukkan konsentrasi emisi CO<sub>2</sub>e di jalur komuter dan transit. Pola tersebut berubah dari inventarisasi tahun 2014 dengan pusat emisi terbatas pada kawasan *central business district* (CBD). Kondisi tersebut menunjukkan peningkatan intensitas mobilitas masyarakat sekaligus ketergantungan tinggi pada moda transportasi pribadi.

Sektor transportasi Kota Surakarta menyumbang GRK melalui kegiatan jalan raya dan kereta api. Transportasi jalan raya merupakan moda utama, baik dalam kota maupun kegiatan komuter (perjalanan antar kota dalam jarak relatif dekat). Transportasi kereta api menjadi moda mobilitas darat utama, khususnya untuk jarak menengah dan jauh. Transportasi jalan raya atau *mobile source on road* dianggap sebagai salah satu sumber emisi GRK utama pada masyarakat modern. Hal ini tidak terlepas dari peningkatan mobilitas masyarakat untuk melakukan beragam aktivitas terutama terkait dengan kegiatan antropogenik atau pemenuhan kebutuhan manusia.

Masalah transportasi global bersumber dari kuantitas, sumber energi dan sosiokultural masyarakat. Pada aspek kuantitas jumlah unit kendaraan mengalami peningkatan signifikan. Pertumbuhan populasi tetap menjadi driving factor. Pressure kondisi ini berasal dari peningkatan ekonomi, kebutuhan mobilitas dan kepemilikan kendaraan pribadi. Aspek kuantitas bersinergi dengan dua aspek lain untuk memperburuk kondisi GRK sektor ini. Pada aspek sosiokultur menunjukkan keenganan masyarakat untuk beralih pada moda publik. Moda pribadi tetap menjadi preferensi utama karena alasan kenyamanan. Masyarakat pun memiliki kecenderungan enggan menggunakan moda ramah lingkungan untuk bermobilitas seperti sepeda dan berjalan kaki.

Ketergantungan pada bahan bakar fosil sebagai sumber energi transportasi masih sangat tinggi. Hal ini disebabkan oleh simpangan besar pada penemuan, penyediaan dan distribusi teknologi ramah lingkungan. Teknologi ramah lingkungan transportasi belum inklusif karena kebutuhan modal tinggi dalam penyediaannya.

Kondisi transportasi Surakarta potensial memberikan tekanan emisi besar dengan tren cenderung meningkat. Seperti telah dijabarkan sebelumnya, masalah utama emisi transportasi Surakarta adalah status kota sebagai pusat perekonomian dan layanan wilayah hinterland. Status tersebut memberikan beban tambahan emisi GRK yang disumbang oleh komuter maupun kegiatan transit.

Tekanan kedua berasal dari kondisi internal dengan peningkatan kepemilikan serta penggunaan moda kendaraan pribadi. Statement dari Samsat Surakarta menyatakan bahwa saat ini diperkirakan terjadi peningkatan sepeda motor 50 unit/hari dan mobil hingga 25 unit/hari (pers.comm., 2019). Jumlah tersebut mendeskripsikan potensi peningkatan emisi GRK tahunan dari sektor transportasi di Surakarta.

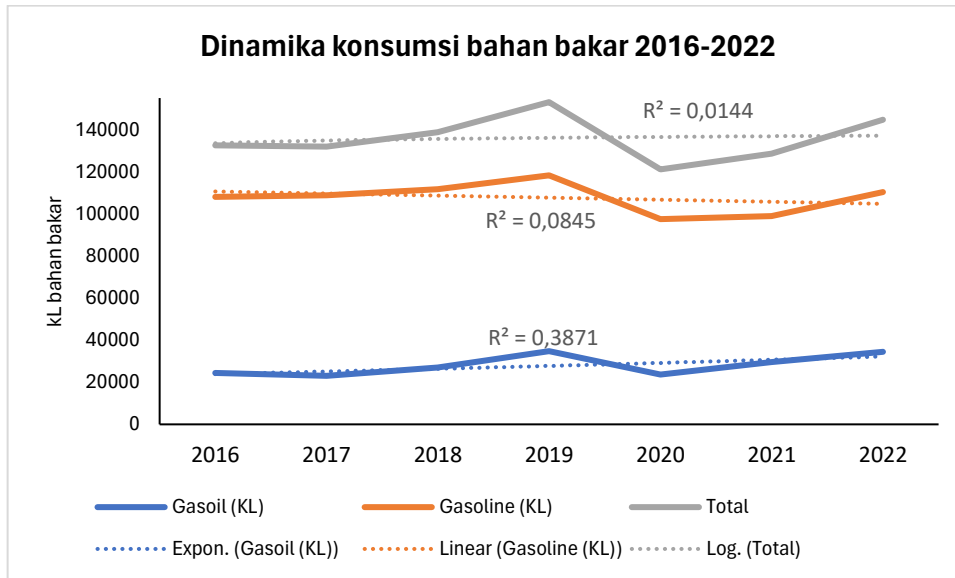
Tekanan ketiga berasal dari proyeksi Surakarta menuju destinasi pariwisata, kebudayaan dan MICE. Proyeksi tersebut sama saja memberi tantangan besar pada penyediaan transportasi wisatawan maupun tamu,

baik moda jarak jauh (bus) maupun dalam kota. Proyeksi ekonomi kota sekaligus peningkatan kebutuhan mobilitas akan memunculkan laten potensi tekanan emisi GRK lain dari sektor transportasi yaitu transportasi online. Moda transportasi online sebenarnya dapat menjadi solusi untuk menekan pertumbuhan kendaraan pribadi bila dimanajemen dengan baik. Permasalahannya, moda ini cenderung meningkatkan pembelian kendaraan pribadi.

Tekanan keempat adalah minat rendah masyarakat untuk beralih pada mode transportasi publik. Kota Surakarta memiliki moda transportasi publik berikut keterpaduan yang berkualitas dan memadai secara kuantitas. Batik Solo Trans sebagai ujung tombak transportasi publik didukung oleh feeder dan integrasi dengan moda lain yaitu kereta api serta bandara. Pembangunan pedestrian dan jalur sepeda telah dilakukan untuk menyediakan fasilitas layak bagi pejalan kaki maupun pesepeda. Namun, ketersediaan fasilitas transportasi publik tersebut seakan belum mendapat respon positif dari masyarakat ditandai dengan peranserta yang masih cukup rendah. Laju lambat shifting transportasi umum pada akhirnya memaksa pemerintah melakukan pembangunan struktural sebagai mitigasi. Kecenderungan dampak pembangunan struktural adalah peningkatan jumlah kendaraan pribadi karena persepsi masyarakat yang mendapat kenyamanan dari infrastruktur jalan baru.

Tekanan kelima adalah kompleksitas masalah pengendalian kendaraan bermotor. Komuter dan transit menjadi masalah utama pengelolaan transportasi Kota Surakarta sekaligus mitigasi GRK yang dihasilkan. Penyelesaian masalah komuter tentu saja wajib melibatkan pemerintah kabupaten lain yang masuk dalam kawasan Subosukawonosraten. Hal tersebut tentu bukan perkara mudah karena terkait visi dan sasaran pembangunan ekonomi di wilayah lain. Pembangunan jalur lingkaran sebagai contoh upaya struktural dalam mitigasi transportasi pun membutuhkan kesepakatan dengan kabupaten lain karena segmen jalan yang mengiris pada wilayah lain.



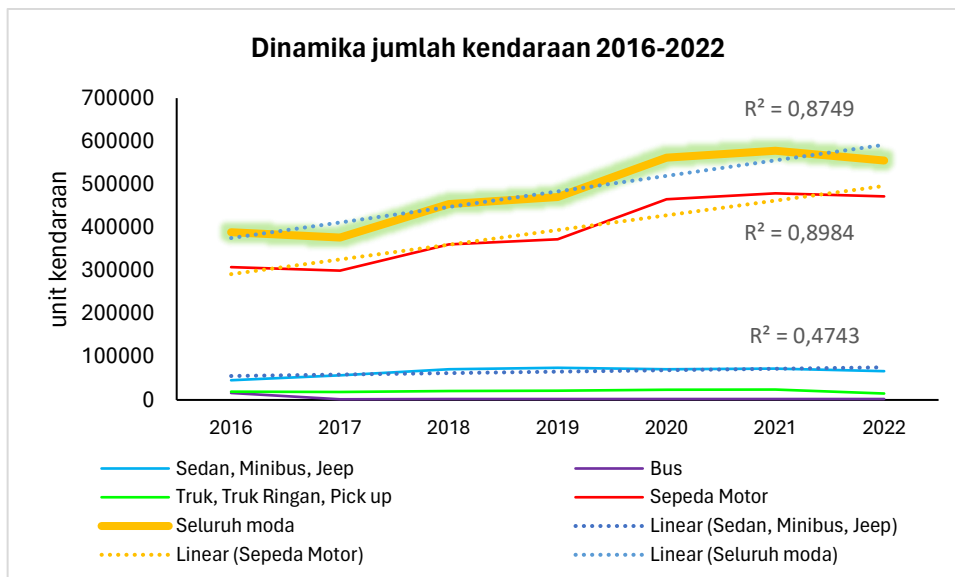


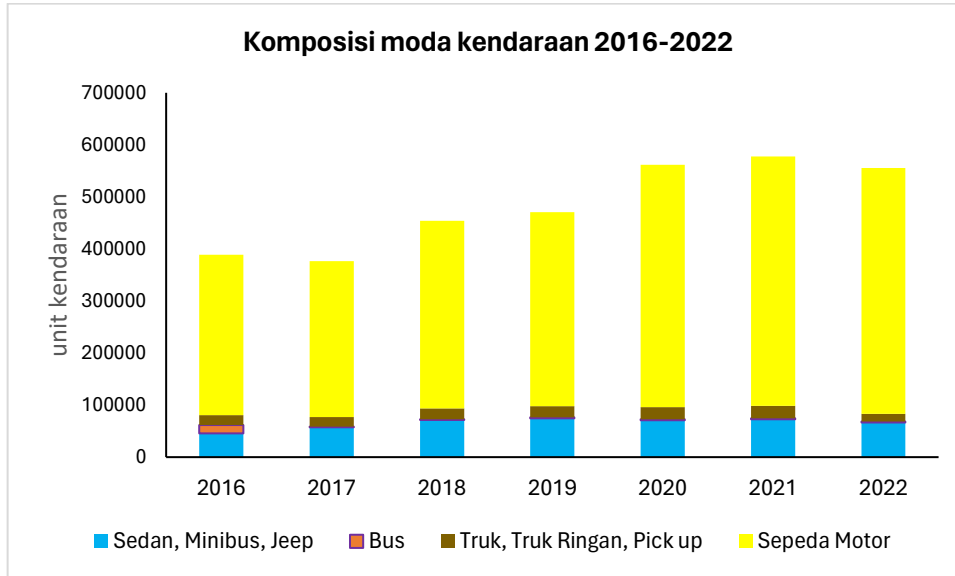
**Gambar 15. Dinamika konsumsi bahan bakar transportasi Kota Surakarta pada periode 2016-2022 (sumber data : pengolahan data BPS Provinsi Jawa Tengah, 2022, DLH Kota Surakarta, 2023)**

Nilai penjualan bahan bakar fosil transportasi jalan raya di Kota Surakarta masih pada tren meningkat. Penurunan terjadi namun lebih didorong oleh situasi tidak terduga. Sebagai contoh adalah kondisi pandemi pada 2020 yang menurunkan penjualan secara signifikan (Gambar 14). Pandemi menjadi faktor penting yang secara temporer berhasil menurunkan konsumsi bahan bakar akibat pembatasan aktivitas sekaligus mobilisasi masyarakat. Berdasarkan estimasi nilai emisi meningkat pasca pandemi mengikuti jumlah penjualan bahan bakar yang juga mengalami peningkatan. Perhitungan periodik sejak 2012 menunjukkan dinamika fluktuatif pada penjualan bahan bakar meskipun kecenderungannya mengalami tren meningkat ( $r^2 : 0,0144$ ). Tren meningkat lebih terlihat pada solar (gasoil) yang nilai konsumsinya konstan meningkat meski tipis. Konsumsi solar tidak terpengaruh oleh pandemi karena dominan digunakan oleh kendaraan logistik (moda LDV maupun HDV). Fluktuasi penggunaan bahan bakar secara langsung mempengaruhi nilai GRK Kota Surakarta karena menjadi dasar utama dalam perhitungan.

Penjualan bahan bakar transportasi tahun 2022 masih didominasi oleh jenis gasoline. Total penjualan keseluruhan mencapai 144764 kL yang terdiri dari 110332 kL gasoline (bensin) dan 34432 gasoil (solar). Dominasi tipe bahan bakar gasoline (76,22%) mengindikasikan tingginya angka penggunaan kendaraan pribadi. Hal ini disebabkan karena ketiga tipe bahan bakar gasoline identik dengan beragam jenis kendaraan pribadi, berupa sepeda motor maupun mobil.

Data kepemilikan kendaraan bermotor Kota Surakarta menunjukkan tren yang terus meningkat pada periode 2016-2022. Determinasi peningkatan tersebut tergolong signifikan ( $r^2 : 0,875$ ). Pada tahun 2022 jumlah keseluruhan moda kendaraan bermotor mencapai 555249 unit. Moda pribadi mengalami peningkatan signifikan terutama pada sepeda motor ( $r^2 : 0,898$ ). Hasil penelitian Himawan (2023) menunjukkan kondisi bahwa pada jalur-jalur utama (main road) telah terjadi pergeseran kontributor emisi dari sepeda motor pada 2015 menjadi mobil pada perhitungan 2022.





**Gambar 16. Dinamika kepemilikan dan komposisi kendaraan bermotor Kota Surakarta pada periode 2016-2022 (sumber data : pengolahan data BPS Kota Surakarta, 2021, DLH Kota Surakarta, 2023)**

Perhitungan emisi membutuhkan data aktivitas yang dikonversi menjadi kalor (GJ) dengan memanfaatkan nilai *net calorific value* (NCV) yang berlaku dalam standar internasional pada masing-masing jenis bahan bakar. Selain itu, perhitungan emisi juga mengaplikasikan faktor emisi yang disediakan dari petunjuk teknis IPCC (2006). Berikut adalah detail *net calorific value* dan faktor emisi tersebut.

**Tabel 11. *Net calorific value* (NCV) dan faktor emisi aktivitas transportasi**

No	Jenis Bahan Bakar	NCV (GJ/l)	Faktor emisi (kg/TJ)			Keterangan
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	Gasoline	0,0348	69300	10	0,6	IPCC, 2006 untuk sumber bergerak
2	Diesel	0,0387	74100	10	0,6	IPCC, 2006 untuk sumber bergerak
3	Biodiesel	0,0387	74100	10	0,6	IPCC, 2006 untuk sumber bergerak

Sumber : IPCC (2006)

Berikut adalah hasil perhitungan emisi sektor transportasi Kota Surakarta (jalan raya dan kereta api) berbasis metode penjualan bahan bakar dengan mengaplikasikan data aktivitas dan faktor emisi.

**Tabel 12. Hasil Inventarisasi GRK Sektor Transportasi Tahun 2023**

No	Kategori	Estimasi emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	Jalan raya	340727.00	125.00	16.00	348312.00
2	Kereta api	1440.97	0.08	0.08	1466.35
<b>Total Emisi transport</b>		<b>342167.97</b>	<b>125.08</b>	<b>16.08</b>	<b>349778.35</b>

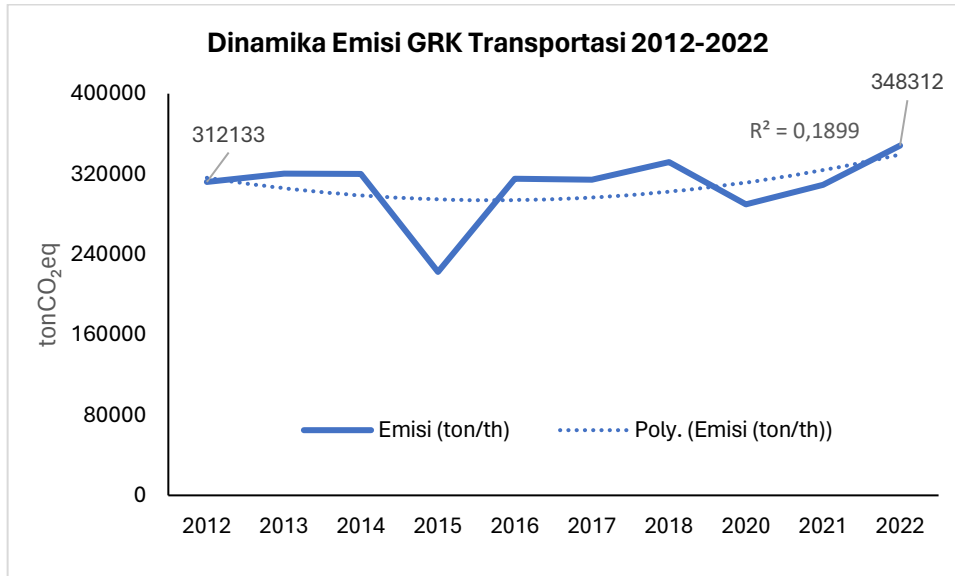
Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2022)

Transportasi masih muncul sebagai ancaman bagi harmoni lingkungan udara Kota Surakarta (lihat pie chart pada gambar 13). Sektor transportasi jalan raya merupakan kontributor GRK terbesar pada kluster penggunaan energi. Pada inventarisasi tahun 2023 nilai GRK sektor ini mencapai 34977 tonCO<sub>2</sub>eq atau setara dengan 74,31% GRK kluster penggunaan energi tanpa memasukkan bangkitan listrik.

Nilai GRK tersebut diperoleh dari data aktivitas penjualan bahan bakar cair (gasoline maupun gasoil) di Kota Surakarta pada tahun 2022. Populasi dan gaya hidup menjadi driving faktor pada konsistensi peningkatan GRK transportasi jalan raya. Pertambahan populasi nyaris selaras dengan pertumbuhan kepemilikan serta penggunaan moda kendaraan pribadi. Aktivitas komuter menjadi salah satu sumber GRK transportasi potensial. Kondisi tersebut disebabkan oleh kecenderungan kegiatan komuter yang berlangsung konsisten setiap hari (terutama pada hari kerja) dan mengandalkan moda pribadi.

Nilai GRK dari penggunaan bahan bakar transportasi cenderung meningkat meski fluktuatif (pola polinomial,  $r^2 : 0,1889$ ). Peningkatan nilai tersebut dipengaruhi oleh faktor jumlah bahan bakar terjual, regulasi distribusi (pembatasan) dan jenis bahan bakar. Peningkatan total konsumsi bahan bakar cair diikuti dengan konversi jenis bahan bakar gasoil (solar) menjadi biosolar, dengan proporsi semakin meningkat setiap tahun. Pada tahun 2020 dinamika lebih ditentukan oleh kebijakan pembatasan mobilitas karena pandemi. Normalitas kebijakan tersebut mengembalikan tren

peningkatan konsumsi bahan bakar sejak tahun 2021. Pada tahun 2022, perhitungan GRK menunjukkan pola rebound effect muncul pasca pandemi yang menyebabkan nilainya melampaui kondisi sebelum pandemi.



**Gambar 17. Dinamika gas rumah kaca (GRK) transportasi jalan raya Kota Surakarta periode 2012-2022 (Sumber : pengolahan data primer, 2023)**

### **Pendekatan Bottom Up**

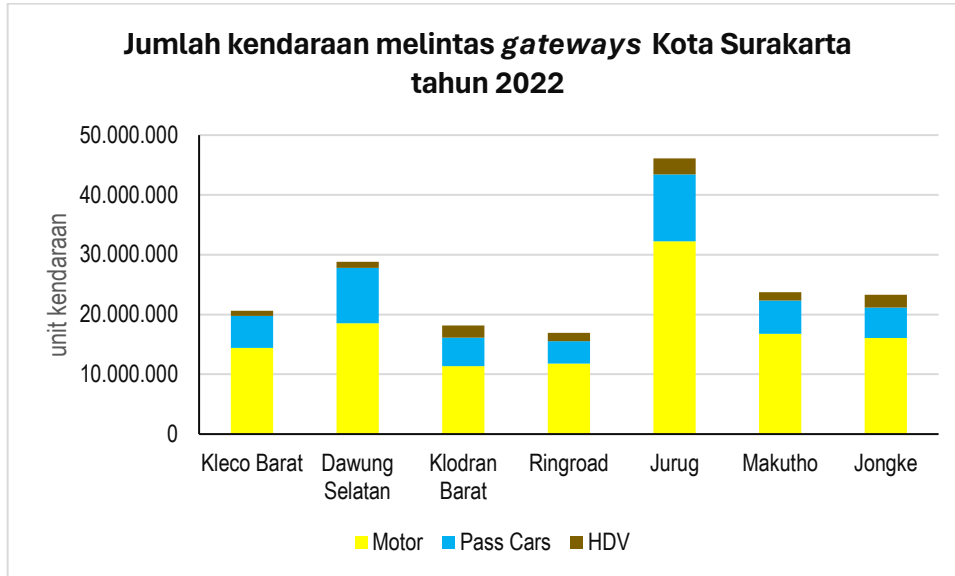
Sales product bahan bakar cair kota Surakarta cenderung mengalami peningkatan pada 2022. Nilai penjualan tersebut masih mengalami tren rebound effect pasca pandemi. Nilai penjualan bahan bakar perlahan mendekati nilai pada periode sebelum pandemi. Kenaikan penjualan cukup signifikan ketika kebijakan pandemi perlahan berakhir tahun lalu. Hal ini praktis meningkatkan GRK transportasi jalan raya karena basis data hitungan IPCC secara absolut hanya menggunakan data tersebut.

Kota Surakarta memiliki karakter khas wilayah yang berhimpit dengan kabupaten lain dan menjadi kawasan pusat perekonomian maupun layanan jasa. Kawasan tersebut dikenal dengan Subosukowonosraten (Surakarta, Boyolali, Sukoharjo, Wonogiri, Sragen dan Klaten) atau Greater Solo.

Interaksi, mobilitas maupun keterikatan aktivitas antropogenik antar kawasan sangat intens. Hal ini memberikan beberapa konsekuensi dan resiko pada lingkungan, termasuk kualitas udara.

Karakter Kota Surakarta menyebabkan ketidakpastian (*uncertainties*) perhitungan dengan hanya berbasis penjualan bahan bakar lokal tinggi. Kemungkinan akan terjadi *underestimate* jika hanya menggunakan data penjualan bahan bakar. Hal ini karena faktor komuter yang sulit diprediksi terutama jika dihubungkan dengan aktivitas pengisian bahan bakar sebagai standar perhitungan GRK basis *top down*. Sebagian besar kendaraan komuter diprediksikan mengisi bahan bakar di luar wilayah administrasi (misal pada lokasi domisil) yang tidak tercatat oleh data penjualan lokal. Batas batas administratif menunjukkan antarwilayah saling berhimpit sehingga probabilitas pengisian bahan bakar di luar Surakarta tinggi. Bahan bakar tersebut kemudian menjadi tidak terhitung dengan basis data penjualan SPBU Kota Surakarta. Padahal, GRK yang dihasilkan tetap dibuang dan menjadi beban bagi Kota Surakarta.

Pendekatan *bottom up* untuk mendekati angka riil yang mereduksi ketidakpastian (*uncertainties*). Pengambilan data *bottom up* dilaksanakan di jalur gerbang kota. Alasan pemilihan lokasi tersebut karena variabel *uncertainties* pendekatan *topdown* dideterminasi oleh komuter. Alasan lain adalah ketersediaan CCTV Dishub Kota Surakarta yang mampu mengidentifikasi 3 jenis moda transportasi pada jalur gerbang. Terdapat 7 jalur gerbang yang dipantau 24 jam selama 1 tahun yaitu : Kleco, Dawung, Klodran, Ringroad, Jurug, Makutho dan Jongke. Ketujuh jalur tersebut merupakan akses *mainstream* bagi komuter maupun pelintas wilayah untuk memasuki/melewati Surakarta.



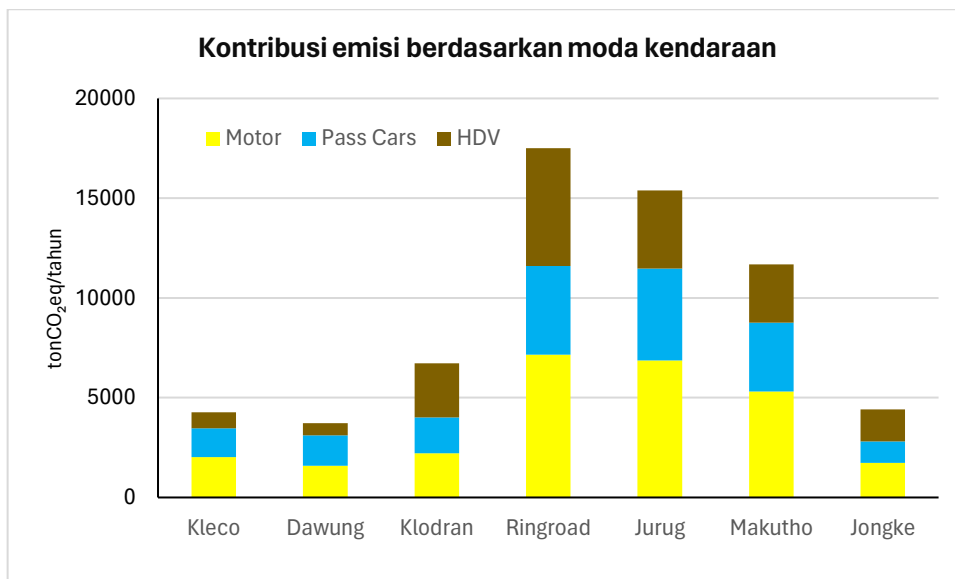
**Gambar 18. Jumlah kendaraan melintas gateways Kota Surakarta berdasarkan jenis moda pada tahun 2022**

Aktivitas komuter menjadi permasalahan pada GRK transportasi jalan raya karena mampu meningkatkan jumlah kendaraan di dalam wilayah administratif secara signifikan. Data Dinas Pehubungan melalui pemantauan CCTV 24 jam pada gateways Surakarta mencatat 177.637.937 unit kendaraan sepanjang 2022 melintas. Komposisi jenis kendaran didominasi oleh sepeda motor (68,2%) diikuti oleh mobil penumpang/passengers cars (25,32%) dan kendaraan berat/high duty vehicle (6,48%). Nilai tersebut jelas melampaui secara signifikan jumlah kendaraan teregistrasi Kota Surakarta yang pada tahun 2022.

**Tabel 13. Informasi umum gateways Kota Surakarta**

No	Gateways	Nama Jalan	Panjang (km)	Panjang terhitung (km)	Direksi jalan
1	Kleco	Slamet Riyadi	5.78	1.26	Dua arah
2	Dawung	Yos Sudarso	2.16	0.77	Dua arah
3	Klodran	Adi Sumarmo	1.76	1.76	Dua arah
4	Ringroad	Ringroad	5.49	5.49	Dua arah
5	Jrug	Sutami+Sutarto	3.11	1.92	Dua arah
6	Makutho	Adi Sucipto	3.92	2.86	Dua arah
7	Jongke	Rajiman 2 way	3.05	0.974	Dua arah

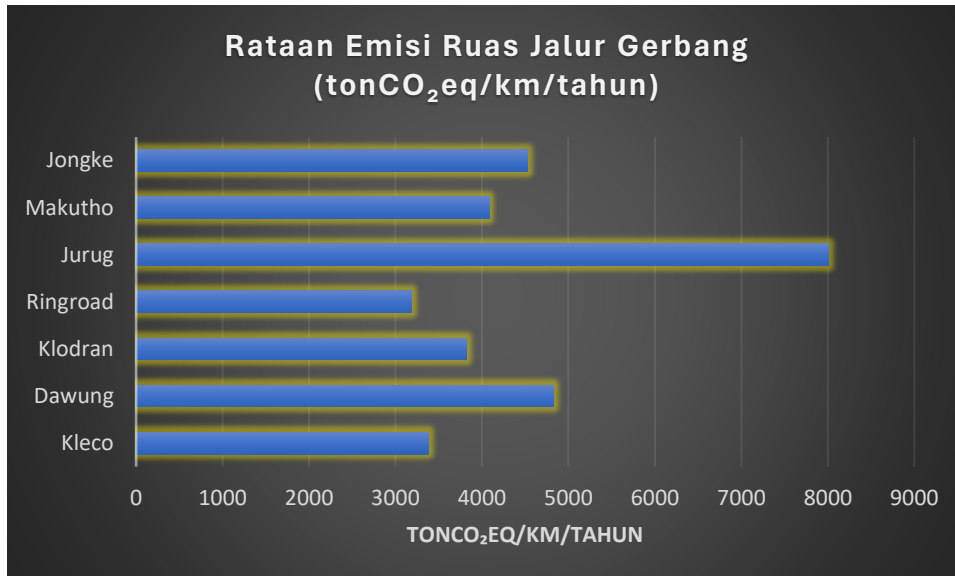
Hasil simulasi tahunan pada *gateways* menunjukkan total emisi mencapai 63705,48 tonCO<sub>2</sub>eq hanya untuk 15,04 km jalur pantauan. Nilai tersebut setara dengan GRK 4236,58 tonCO<sub>2</sub>eq/km/tahun. Konversi GRK untuk menunjukkan nilai keseluruhan ruas jalan Kota Surakarta dengan mengalikan 200 km (setara 97% panjang jalan kota). Hasil konversi memberikan asumsi nilai GRK transportasi secara bottom up sebesar 910056,32 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun pada 2022. Nilai tersebut hampir 3 kali lipat hasil hitung berbasis *sales product* bahan bakar (*top down*).



**Gambar 19. Kontribusi GRK transportasi jalan setiap gateways Kota Surakarta berdasarkan jenis moda kendaraan tahun 2022**

Nilai GRK pada setiap *gateways* berbeda. Nilai GRK tertinggi diperoleh pada segmen pantauan Ring Road dan Jurug dan terendah pada Dawung. Nilai tersebut menunjukkan GRK berbasis kendaraan melintas dengan kilometer pantau berbeda. Hasil lebih fair ditampilkan pada rata-rata emisi per kilometer untuk menunjukkan level kepadatan arus kendaraan pada setiap segmen jalan pantauan.





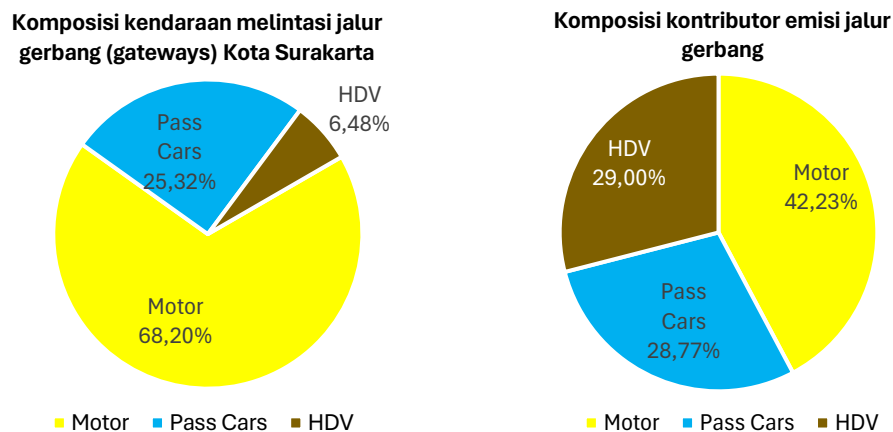
**Gambar 20. Nilai GRK pada setiap gateways berdasarkan analisis GRK per kilometer pada tahun 2022**

Gambar 20 menunjukkan bahwa GRK perkilometer terbesar didapati di *gateways* Jurug yaitu Jl Ir Sutami (8013,10 tonCO<sub>2</sub>eq/km/tahun) diikuti oleh *gateways* Dawung yaitu Jl Yos Sudarso (4831,34 tonCO<sub>2</sub>eq/km/tahun). Kondisi tersebut menguatkan asumsi kontribusi yang besar dari aktivitas komuter dan transit terhadap GRK Kota Surakarta. *Gateways* Jurug menjadi akses utama kendaraan transit dari arah timur Pulau Jawa termasuk bus dan truk. *Gateways* ini juga menjadi akses utama komuter dari arah timur (Kabupaten Karanganyar, Sukoharjo dan Sragen). Keberadaan tol trans Jawa dan Road Mojosongo hanya mengurangi sebagian kecil arus transit. Kelompok komuter dari arah timur dengan kepentingan bekerja, berdagang atau mendapat layanan jasa (pendidikan dan kesehatan) di Surakarta mayoritas akan melintasi *gateways* Jurug.

*Gateways* Dawung menjadi akses utama bagi komuter dari arah selatan wilayah administratif Kota Surakarta (Kabupaten Sukoharjo dan Wonogiri). Pada periode jam tertentu, jalur ini juga dipadati oleh armada bus antar kota dari arah Kabupaten Wonogiri. Beban emisi GRK dari jalur Dawung akan semakin tinggi ketika sesi weekend atau lomng weekend tiba karena keberadaan beberapa pusat perbelanjaan (mall) pada kota satelit

Solo Baru. Bangkitan lalu lintas juga terjadi dari multiarah yaitu wilayah administratif Surakarta maupun kawasan lain yang harus melintas wilayah Surakarta untuk mencapai wisata belanja tersebut.

Tekanan GRK transportasi oleh aktivitas komuter diperkuat dengan nilai cukup tinggi pada gateways Jongke (Jl Dr Rajiman) dan Makutho (Jl Adi Sucipto). Kedua jalur tersebut menjadi akses komuter dari arah barat. Gateways Jongke dari arah Kabupaten Sukoharjo dan Klaten sedangkan gateways Makutho dari arah Kabupaten Boyolali dan Kecamatan Colomadu (*enclave area* Kabupaten Karanganyar).



**Gambar 21. Komparasi antara komposisi jumlah kendaraan dan kontribusi emisi GRK berdasarkan pada jenis moda di 7 gateways Kota Surakarta pada tahun 2022**

Gambar 21 menunjukkan moda kendaraan pribadi menjadi preferensi utama mobilitas komuter di Kota Surakarta. Kombinasi mobil pribadi dan sepeda motor menghasilkan angka kontribusi 93,52% pada jumlah kendaraan yang melintasi gateways Surakarta. Hal tersebut tidak selalu selaras dengan kontribusi GRK setiap jenis moda kendaraan. Kontribusi GRK sepeda motor tetap menjadi yang terbesar karena dominasi unit yang signifikan. Namun, nilai kontribusi GRK sepeda motor hanya 42,23%. Nilai GRK berikutnya dikontribusikan oleh moda HDV yang mewakili kendaraan angkut berat (bus dan truk) dengan 29%. Nilai GRK HDV berselisih tipis dengan mobil penumpang (28,77%). Kondisi ini menunjukkan mobilitas

logistik sebagai penciri aktivitas transit jalan raya memberikan kontribusi cukup signifikan bagi Kota Surakarta. Ketiadaan jalan lingkar menyebabkan kendaraan angkut logistik harus melintas di dalam kota meskipun tidak bertujuan di Kota Surakarta.

### **Kereta Api**

Kereta api merupakan moda transportasi publik dengan karakter berbeda dan lebih ramah lingkungan karena efisiensi bahan bakar terhadap kapasitas pengangkutan dalam satu trayek. Kota Surakarta merupakan salah satu wilayah dengan rute kereta api padat baik untuk memfasilitasi perjalanan jarak jauh maupun komuter. Untuk kategori komuter sejak tahun 2020 PT KAI telah menyediakan kereta rel listrik commuter line (KRL CL) untuk melayani rute Surakarta-Yogyakarta dengan bahan bakar listrik menggantikan Prameks bermesin diesel. Kota Surakarta juga memiliki trayek baru kereta yang melayani interkoneksi antar moda transportasi dengan Bandara Internasional Adi Soemarmo (KA BIAS). Layanan kereta api juga dilengkapi KA Batara Kresna sebagai fasilitas komuter ke arah selatan menuju Kabupaten Sukoharjo dan Kabupaten Wonogiri. Ketersediaan ragam dan trayek kereta api tersebut diharapkan dapat mengurangi penggunaan moda transportasi pribadi, terutama untuk aktivitas komuter.

Berdasarkan data yang diperoleh dari KAI Stasiun Balapan maupun koleksi trayek komuter lokal terdapat total 86 trayek perjalanan kereta api penumpang dari, menuju dan melintas wilayah administratif Kota Surakarta. Trayek tersebut hanya menghitung pada kereta api berbahan bakar diesel (solar). Untuk jenis KRL tidak dihitung karena menggunakan listrik. Detail trayek tersebut adalah 60 perjalanan kereta penumpang jarak jauh, 22 trayek KA BIAS dan 4 trayek kereta komuter (Batara Kresna). Kereta api menggunakan satu tipe bahan bakar yaitu diesel (LSD) dengan rasio 2,5 l/km. Perhitungan emisi akan memanfaatkan jarak lintas kereta di wilayah

Kota Surakarta dengan lintasan terpanjang mencapai 12,646 km dan terpendek 1,4 km.

Hasil inventarisasi GRK transportasi kereta api dilakukan dengan memperhitungkan lintas kereta yang melewati wilayah administratif Kota Surakarta. Nilai GRK kereta api tahun 2023 mencapai 1466,35 tonCO<sub>2</sub>e/tahun. Nilai tersebut tergolong lebih rendah dibandingkan tahun sebelumnya karena keberadaan beberapa rute yang menggunakan bahan bakar listrik. Kereta api merupakan moda angkutan pribadi yang menjanjikan karena efektivitas pengangkutan (berkapasitas besar) sehingga mampu mengefisienkan energi. Kereta api dapat menjadi solusi angkutan komuter dari wilayah wilayah yang dilintasi. Pada kawasan Subosukowonosraten melintasi hampir keseluruhan wilayah *hinterland* kecuali Boyolali. Hal ini menjadi peluang konversi jenis kendaraan komuter dengan penambahan ritase kereta lokal, terutama untuk pelayanan kawasan Subosukowonosraten.

### **Upaya Mitigasi GRK Transportasi**

Penekanan pada paparan tersebut adalah tindakan mitigasi reduksi GRK sektor transportasi belum efektif. Upaya pada efisiensi melalui konversi teknologi maupun pembangunan struktur baru (pelebaran ruas jalan, pembangunan *fly over* hingga penyediaan transportasi publik) belum mencapai efektivitas yang diharapkan dalam mengendalikan GRK sektor transportasi. Penurunan emisi lebih dikarenakan pembatasan *supply* bahan bakar kendaraan atau faktor eksternal yang memaksa manusia untuk mengurangi intensitas pergerakannya.

Pemerintah Kota Surakarta telah memiliki kebijakan dan melakukan aksi terkait pengendalian emisi transportasi. Beberapa yang populer adalah penyediaan Batik Solo Trans, Batara Kresna, interkoneksi antar moda, penyediaan *citywalk* pembangunan *fly over* dan modifikasi lalu lintas, kampanye ramah lingkungan (*car free day* dan *car free night*) hingga pengecekan emisi rutin maupun sporadis. Program program tersebut

beberapa diantaranya tampak tidak terlalu efektif. BST dan penyediaan interkoneksi *skybridge* kurang diminati oleh masyarakat meski telah menyediakan layanan prima.

Pelaksanaan FGD Laporan Akhir Inventarisasi GRK 2021 memberikan konklusi perlunya kerjasama antar instansi lokal maupun antar wilayah di Greater Solo untuk memitigasi emisi transportasi Surakarta. Dinas Perhubungan saat ini sedang merencanakan penggratisan angkutan umum (terutama untuk layanan antar jemput pelajar). BST generasi terbaru bahkan telah dilengkapi dengan fasilitas digital dalam wujud aplikasi. Aplikasi tersebut dapat diunduh secara mandiri maupun tersedia pada beberapa halte BST. Tujuan aplikasi tersebut adalah memberikan informasi mengenai trayek, waktu hingga ketersediaan *feeder bus* (angkot) pada pengguna yang diharapkan mampu menjawab tantangan kepastian waktu dan menambah kenyamanan.

Penambahan moda transportasi massal yang terkoneksi satu dengan lain serta melayani lokasi lokasi strategis menjadi prioritas bersama pemerintah pusat maupun lokal. Salah satu yang telah beroperasi adalah kereta bandara Adi Sumarmo, penyediaan KRL CL dan kereta komuter lainnya. Pada Stasiun Balapan moda tersebut bisa langsung terkoneksi dengan Terminal Tirtonadi untuk berganti ke moda bus umum melalui *skybridge* yang akan mengurangi penggunaan kendaraan bermotor pada perpindahan antar moda. Hal yang sama berlaku pada Stasiun Purwosari yang telah terkoneksi dengan jalur angkutan umum BST dengan penyediaan halte. Pemerintah Surakarta telah menyediakan jalur khusus sepeda untuk memberikan akses kenyamanan dan keselamatan bagi pengguna sepeda. Tujuannya adalah untuk mengalihkan kecenderungan kendaraan menjadi bebas bahan bakar fosil (sepeda). Penyediaan tersebut berlangsung bersamaan dengan penambahan ruas ruas pedestrian berkualitas untuk pejalan kaki, terutama di jalur jalur utama *central business district* (CBD) Kota Surakarta.



**Gambar 22. Upaya pengelolaan GRK sektor transportasi Kota Surakarta melalui (searah jarum jam) penyediaan Batik Solo Trans dengan layanan prima, operasional KA BIAS, penyediaan jalur sepeda dan pedestrian yang nyaman serta penyediaan feeder angkot bagi BST**

Mayoritas instansi terkait dengan mitigasi GRK transportasi sepakat bahwa sektor tersebut menjadi masalah pelik untuk diatasi. Beberapa faktor yang menghambat upaya mitigasi antara lain :

- a) Beban transportasi dari komuter, terutama pada hari kerja (*weekdays*)
- b) Pengembangan Surakarta sebagai destinasi wisata maupun MICE (*meeting, incentive, conference and exhibition*) membuat beban lalu lintas tambahan terutama pada weekend yang berasal dari wisatawan domestik maupun lalu lintas masuk kota kabupaten kabupaten sekitar atau yang berdekatan.

- c) Beban transportasi temporer akibat perbaikan maupun pembangunan infrastruktur penyokong transportasi (perbaikan jembatan atau pembangunan rel layang)
- d) Beban lalu lintas juga akan bertambah pada saat penyelenggaraan event event besar di Kota Surakarta.
- e) Kemudahan memiliki kendaraan pribadi, baik mobil maupun sepeda motor dengan rasio operasional yang tinggi
- f) Kultur atau budaya masyarakat yang enggan menggunakan kendaraan umum maupun mengoptimalkan pola transportasi bebas emisi bahan bakar fosil (berjalan kaki maupun bersepeda)
- g) Pertumbuhan dan perkembangan transportasi online, Pada satu sisi dapat mengalihkan masyarakat dari ketergantungan kendaraan pribadi sebagai sisi positif, namun sisi negatif adalah ketiadaan regulasi pembatasan membuat pembelian kendaraan untuk kepentingan ini menjadi melonjak dalam beberapa tahun terakhir
- h) Kecenderungan pendekatan modifikasi yang masih

Realitas menunjukkan bahwa pemerintah telah hadir dalam upaya menekan GRK sektor transportasi di Kota Surakarta namun belum mencapai harapan pada efektivitas. Evaluasinya adalah mayoritas program tersebut masih bersifat adoptif dan belum menjadi sebuah *system thinking* yang memunculkan solusi secara holistik. Masyarakat belum sepenuhnya teradaptasi dan berpartisipasi dalam program tersebut. Penyediaan struktur baru seperti *flyover* malah mengesankan pada upaya menyediakan fasilitas nyaman bagi masyarakat untuk menggunakan moda pribadi. Kondisi yang menunjukkan bahwa aspek sosiokultur masyarakat harus lebih dahulu disentuh untuk mau berperan serta dalam program pengendalian emisi.

Batik Solo Trans menjadi moda utama dalam pelayanan transportasi publik Kota Surakarta. Layanan BST didukung oleh feeder angkot dengan ukuran kendaraan lebih kecil untuk menjangkau wilayah lebih luas dan sulit diakses layanan kendaraan besar seperti bus kota. Jumlah koridor layanan BST maupun angkot saat ini adalah 6 trayek. Jumlah keseluruhan armada

BST mencapai 104 unit sedangkan feeder angkot mencapai 100 unit. Layanan BST dan feeder telah mengoptimalkan pendekatan modern dan smart melalui pemanfaatan sistem digital melalui aplikasi Temanbus, penggunaan e-money dan display operasional futuristik pada halte. berikut adalah detail pembagian layanan BST maupun feeder angkot di Kota Surakarta.

Tabel 14. Detail informasi koridor layanan Batik Solo Trans dan feeder angkot di Kota Surakarta

Batik Solo Trans				Feeder BST			
Kor	Rute	Jarak tempuh (km)	Unit	Kor	Rute	Jarak tempuh (km)	Unit
K1S	Palur-AdiSumarmo	56,20	27	K7FS	Ngipang-Ps Klewer	(NA)	16
K2S	Palur-Kerten	31,13	14	K8FS	Mojosongo-Lotte	(NA)	16
K3S	Kartasura-Thionging	45,24	14	K9FS	MojosongoSemanggi	(NA)	17
K4S	Kartasura-Palur	55,35	16	K10FS	Palur-Ps Klewer	(NA)	15
K5S	Kartasura-Simpang Sidan	53,18	23	K11FS	Tirtonadi-Pasar Klewer	(NA)	17
K6S	Tirtonadi-Solo Baru	21,75	10	K12FS	Ps Klewer-Lap Gentan	(NA)	19

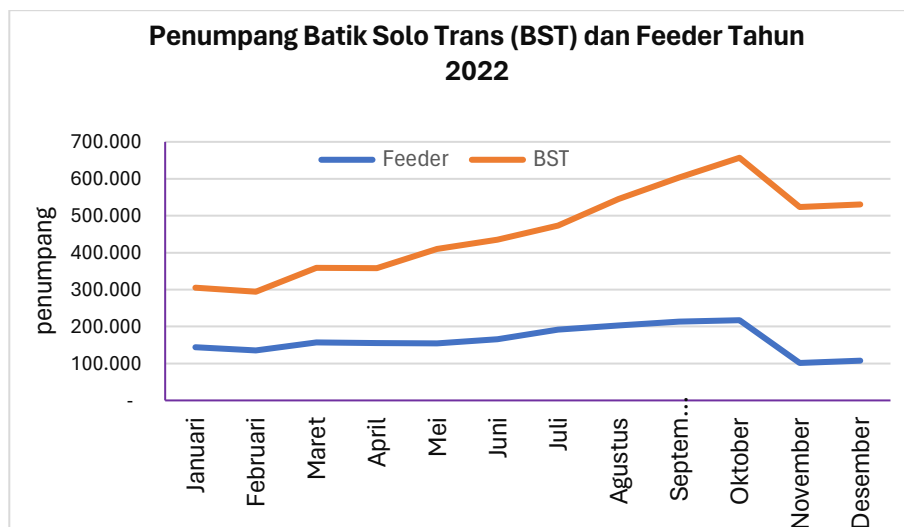
Layanan transportasi publik di Kota Surakarta diproyeksikan akan bertambah di masa depan. Saat ini, BRT Jawa Tengah telah beroperasi melayani trayek Surakarta hingga Wonogiri. Trayek tersebut diproyeksikan bertambah menjangkau seluruh kawasan Subosukowonosraten dengan salah satunya adalah rute Surakarta menuju pusat perkotaan Karanganyar. Ketersediaan transportasi publik saat ini didukung pula oleh operasional KRL melayani rute Surakarta-Jogjakarta, KRD Batara Kresna melayani rute Surakarta-Sukoharjo-Wonogiri dan Kereta Bandara Internasional Adi Sumarmo (BIAS).

Peranserta masyarakat sebagai konsumen moda transportasi publik terutama BSR dan feeder dipandang belum optimal. Hasil pengamatan load factor antar halte menunjukkan ketimpangan (Himawan, 2023). Layanan



BST yang melewati kawasan perkotaan memiliki daya tarik berbeda dalam penggunaannya (Nancy, 2023). Beberapa koridor BST memiliki *load factor* yang baik, seperti pada K1S dan K2S. Koridor tersebut memiliki rute panjang melintasi wilayah pemukiman *urban fringe* hingga CBD. Koridor lain teramati masih cukup sepi penumpang seperti untuk K5S dan K6S.

Data Dinas Perhubungan Kota Surakarta menunjukkan jumlah total penumpang transportasi publik tahun 2022 mencapai 7,39 juta. Detail penumpang adalah untuk BST mencapai 5,49 juta dan feeder mencapai 1,94 juta. Jumlah penumpang BST maupun feeder mengalami peningkatan pasca pandemi. Jumlah penumpang tertinggi pada 2022 terjadi pada bulan Oktober 2022 namun mengalami penurunan pada 2 bulan berikutnya.



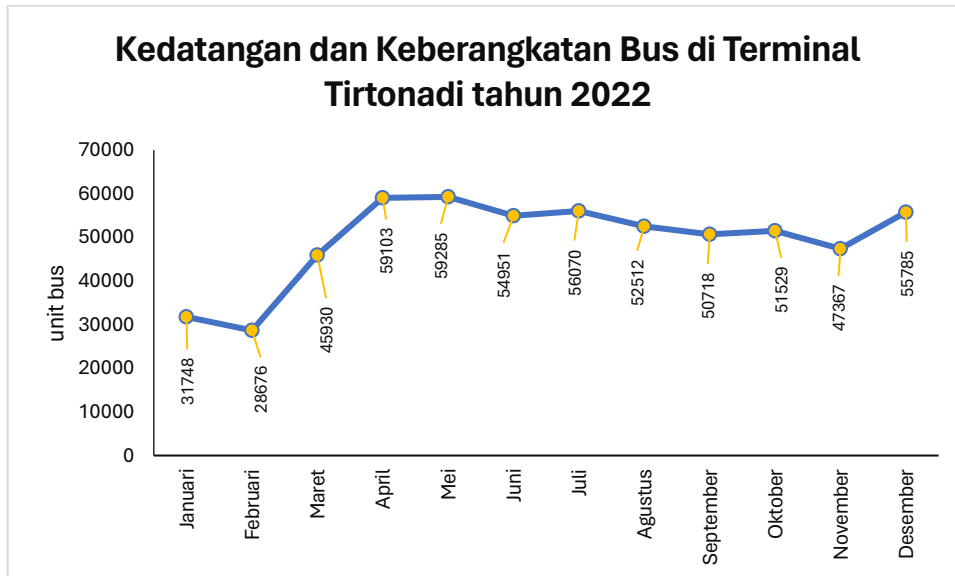
**Gambar 23. Dinamika jumlah penumpang bulanan Batik Solo Trans (BST) dan feeder tahun 2022**

Pelajar merupakan kelompok konsumen utama BST maupun feeder. Kondisi tersebut teramati pada observasi yang dilakukan Nancy et al (2022). Alasan utama pemilihan moda transportasi publik adalah karena biaya murah bahkan masih gratis pada tahun 2022. Pada tahun 2023 tarif BST diterapkan dengan pemberian subsidi pada pelajar melalui mekanisme penggunaan kartu e-money khusus. Tarif untuk pelajar dan mahasiswa S1 mendapatkan layanan harga khusus Rp 3700,00 untuk 90 menit penggunaan. Subsidi tersebut berarti kelompok pelajar dan mahasiswa S1

tidak perlu membayar biaya tambahan untuk pergantian rute maupun pergantian pada feeder selama durasi 90 menit. Dishub Surakarta telah melakukan sosialisasi ke sekolah-sekolah negeri di Kota Surakarta untuk memastikan peningkatan penumpang dari kelompok pelajar. Kebijakan ini dipandang tepat sasaran karena hasil penelitian dan FGD emisi transportasi (kerjasama Pemerintah Kota Surakarta dengan KLHK dan GIZ) pada tahun 2014 menunjukkan kegiatan antar jemput sekolah menjadi salah satu penyebab kemacetan.

Tantangan besar sebagai *pressure* mitigasi GRK transportasi adalah status kota, pembangunan infrastruktur dan pelaksanaan event. Surakarta memiliki dua status penting dalam kegiatan ekonomi dan transportasi. Status penting pertama adalah sebagai pusat layanan ekonomi dan jasa bagi kawasan Subosukowonosraten. Hal ini secara otomatis memicu tekanan lebih besar pada GRK transportasi dari sumber kegiatan komuter. Status penting kedua adalah posisi strategis secara geografis pada jalur lintas provinsi di Pulau Jawa. Kondisi tersebut teramati pada data terkait jumlah bus yang melintasi (masuk dan keluar) Terminal Tirtonadi.

Pada tahun 2022 terdapat 593674 armada bus yang masuk Terminal Tirtonadi. Rataan bulan mencapai 49473 armada masuk. Lalu lintas masuk-keluar terminal mengalami peningkatan signifikan pasca pandemi. Bulan April, Mei dan Desember mencapai titik puncak arus masuk-keluar terminal ini yang bersamaan dengan cuti bersama Idul Fitri dan liburan Nataru (Natal dan Tahun Baru). Kepadatan arus bus di Terminal Tirtonadi menunjukkan beban besar pada jalur transit Kota Surakarta yang berimbas pada konsekuensi nilai GRK tinggi.



**Gambar 24. Dinamika bulanan jumlah kedatangan dan keberangkatan bus di Terminal Tirtonadi, Kota Surakarta pada tahun 2022**

Kota Surakarta saat ini memasuki periode pembangunan infrastruktur masif. Pada tahun 2023 dicanangkan 17 pembangunan prioritas. Sebagian besar pembangunan merupakan infrastruktur dengan potensi menarik kunjungan massa seperti Masjid Sheikh Zayed (MSZ) , Solo Safari, Taman Balekambang hingga Islamic Centre. Lokasi-lokasi tersebut akan menjadi bangkitan kepadatan lalu lintas baru. Hal ini terlihat pada kondisi MSZ yang saat ini tercatat dikunjungi 80000 wisatawan saat akhir pekan sebagai wisara religi andalan Kota Surakarta.

Pelaksanaan event menjadi tantangan penting dalam upaya mitigasi GRK transportasi. Kota Surakarta telah menyelenggarakan beragam event dengan skala nasional hingga internasional pasca pandemi. Kegiatan yang sesuai dengan visi kota untuk menjadi salah satu kota MICE utama di Indonesia. Event akan mendatangkan banyak pengunjung ke Kota Surakarta yang berasal dari kawasan hinterland, kota lain di luar Greater Solo hingga mancanegara. Daya tarik event terutama bagi masyarakat kawasan hinterland karena menjadi wahana hiburan gratis dan magnet ekonomi sporadis baru. Kunjungan temporer tersebut secara langsung akan

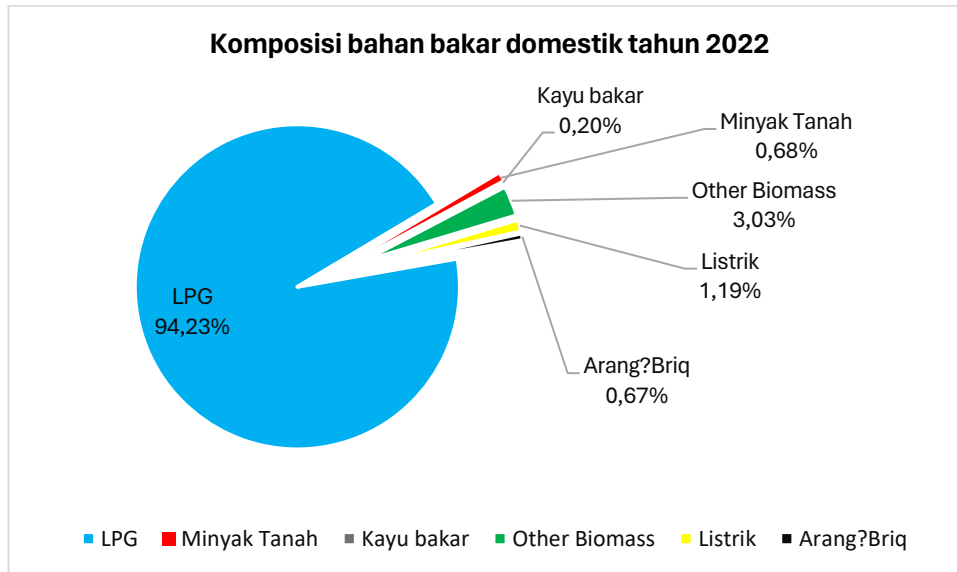
meningkatkan kepadatan lalu lintas Kota Surakarta yang berarti pula beban GRK tambahan sektor transportasi.

Upaya pengendalian GRK Transportasi dilakukan oleh Dishub melalui aksi evaluasi secara langsung kepada kendaraan bermotor. Aksi tersebut dilakukan dengan pengecekan emisi kendaraan secara terjadwal pada ruas-ruas jalan utama di Kota Surakarta. Hal ini melengkapi kewajiban uji emisi pada kendaraan angkut barang dan angkutan umum. Uji emisi on the spot ditujukan pada subyek kendaraan pribadi roda empat yang akan bertambah dengan uji pada kendaraan roda dua pada akhir tahun 2023. Hasil pengujian emisi on the spot secara umum menunjukkan hasil baik dengan hampir 99% kendaraan pribadi lolos uji emisi.

## **(2) Sektor: Domestik**

Penggunaan bahan bakar untuk kebutuhan dasar manusia yaitu pemenuhan kebutuhan primer pangan menjadi salah satu bagian krusial dalam memperhitungkan beban emisi suatu wilayah. Kebutuhan bahan bakar memasak dapat dikelompokkan pada dua kelompok utama yaitu sektor domestik (rumah tangga) dan perdagangan.

Informasi pemerintah setempat menyatakan bahwa pada sektor rumah digunakan jenis bahan bakar tunggal untuk kepentingan memasak yaitu LPG. Pemasalan penggunaan LPG dinyatakan telah tuntas mencapai seluruh rumah tangga (100%) Kota Surakarta pada tahun 2012. Namun, statement BPS dalam FGD IGRK menyatakan masih ada kelompok masyarakat yang mungkin memanfaatkan minyak tanah atau jenis bahan bakar lainnya. Jenis jenis pilihan bahan bakar non LPG tersebut antara alain adalah minyak tanah, kayu bakar dan biomass lainnya.



**Gambar 25. Komposisi konsumsi bahan bakar rumah tangga Kota Surakarta tahun 2022**

Berdasarkan data tahun 2022 bahan bakar rumah tangga dominan oleh penggunaan LPG (94,23%). Hal ini tentu sebagai imbas konversi LPG. Kecenderungan penggunaan LPG meningkat dari tahun ke tahun mengikuti kebutuhan memasak yang ditentukan oleh jumlah populasi. Namun, konsumsi LPG domestik pada 2022 memiliki anomali rasio penurunan dibandingkan tahun sebelumnya (-1,71%%). Kondisi tersebut diprediksikan merupakan rebound effect negatif situasi normalisasi pasca pandemi. Banyak masyarakat yang kembali ke sosiokultur semula untuk makan di luar rumah dan bercengkrama dengan komunitas lokal. Data menunjukkan adanya konsumsi jenis bahan bakar domestik selain LPG dalam persentase sangat kecil. Beberapa diantaranya adalah jenis boros emisi seperti biomassa, arang, kayu bakar dan minyak tanah. Sebanyak 1,19% populasi telah memanfaatkan kompor listrik induksi sebagai bahan bakar domestik. Nilai tersebut meningkat dibandingkan tahun sebelumnya sebagai wujud komitmen PLN untuk mengkonversi energi rumah tangga secara khusus untuk memasak menjadi lebih ramah lingkungan.

Dari penggunaan bahan bakar alternatif tersebut, hanya pada penggunaan kayu bakar yang dapat diperhitungkan dengan pendekatan konsumsi per keluarga Wiersum (1976). Konsumsi non LPG, terutama pada

bahan bakar biomassa seperti kayu, akan meningkatkan GRK karena pembakaran yang tidak efektif sehingga menghasilkan emisi lebih besar.

Estimasi emisi bahan bakar sektor domestik menerapkan pendekatan perhitungan Tier I dengan mengaplikasikan jumlah konsumsi LPG dan kayu bakar untuk diperhitungkan bersama faktor emisi. Berikut ini adalah data aktivitas bahan bakar domestik Kota Surakarta.

**Tabel 15. Konsumsi bahan bakar domestik Kota Surakarta 2022**

No	Sektor Pengguna	Jenis Bahan Bakar	Konsumsi (ton/tahun)
1	Domestik	LPG	38759,54
		Kayu Bakar	572,63

Sumber : BPS Kota Surakarta (2023), DLH Kota Surakarta (2023)

Total konsumsi LPG untuk rumah tangga (domestik) mencapai 38759,54 ton/tahun yang menjadi angka wajar bagi sebuah kawasan perkotaan skala kecil-menengah. Jumlah tersebut setara dengan konsumsi per keluarga mencapai 17,48 kg/bulan (asumsi jumlah keluarga pengguna LPG pada 2022 sebesar 184791 keluarga). Nilai tersebut mengalami peningkatan dari tahun sebelumnya. Kondisi tersebut didorong oleh peningkatan jumlah rumah tangga yang telah menggunakan LPG sebagai bahan bakar memasak. Peningkatan tersebut sekaligus mengindikasikan aktivitas kembali normal sehingga penggunaan LPG memasak pada rumah tangga meingkat. Penggunaan energi kembali terbagi ke lokasi kegiatan perekonomian, perkantoran atau jasa. Aktivitas kuliner sebagai penciri sosiokultural masyarakat Surakarta pun kembali berlangsung normal. *Net calorific value* dan faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan emisi bahan bakar memasak sektor domestik dan perdagangan adalah sebagai berikut

**Tabel 16. Net calorific value (NCV) dan faktor emisi aktivitas domestik**

No	Jenis Bahan Bakar	NCV (GJ/t)	Faktor emisi (kg/TJ)			Keterangan
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	LPG	46,7	63100	5	0,1	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category residential
2	Kayu Bakar	15	112000	300	4	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category residential

Sumber : IPCC (2006)

Memanfaatkan ketersediaan data aktivitas, *net calorific value* dan faktor emisi, maka dapat diperhitungan estimasi emisi untuk bahan bakar memasak sektor domestik (rumah tangga) dengan hasil sebagai berikut.

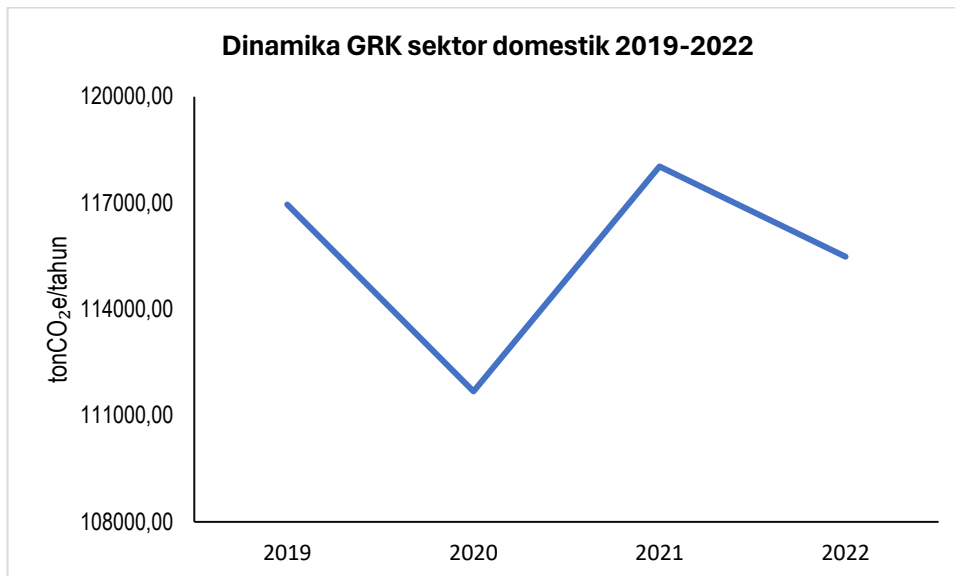
**Tabel 17. Emisi aktivitas domestik Kota Surakarta tahun 2022**

No	Sektor	Jenis bahan bakar	Estimasi emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	Domestik	LPG	114215.46	9.05	0.18	114461.63
		Kayu bakar	962.02	2.58	0.03	962.02
<b>Emisi domestik</b>			<b>115177.48</b>	<b>11.63</b>	<b>0.22</b>	<b>115488.41</b>

Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2022)

Total GRK dari sektor penggunaan energi memasak domestik mencapai 115488,41 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai tersebut mengalami penurunan 2,15% dibandingkan tahun sebelumnya. Penyebab kondisi ini adalah penurunan konsumsi LPG sebagai bahan bakar domestik utama. Emisi dari penggunaan kayu bakar secara konsisten mengalami penurunan. Penurunan konsumsi kayu bakar merupakan kondisi positif bagi upaya mitigasi GRK lokal karena memberikan reduksi nilai secara signifikan. Penurunan konsumsi tersebut diasumsikan telah beralih pada LPG. Penggunaan LPG sesungguhnya telah menjadi pilihan bahan bakar paling ramah lingkungan. Nilai ekuivalen emisi

LPG tergolong paling rendah dibandingkan jenis bahan bakar lain yang juga pernah dimanfaatkan pada sektor domestik seperti minyak tanah dan kayu.

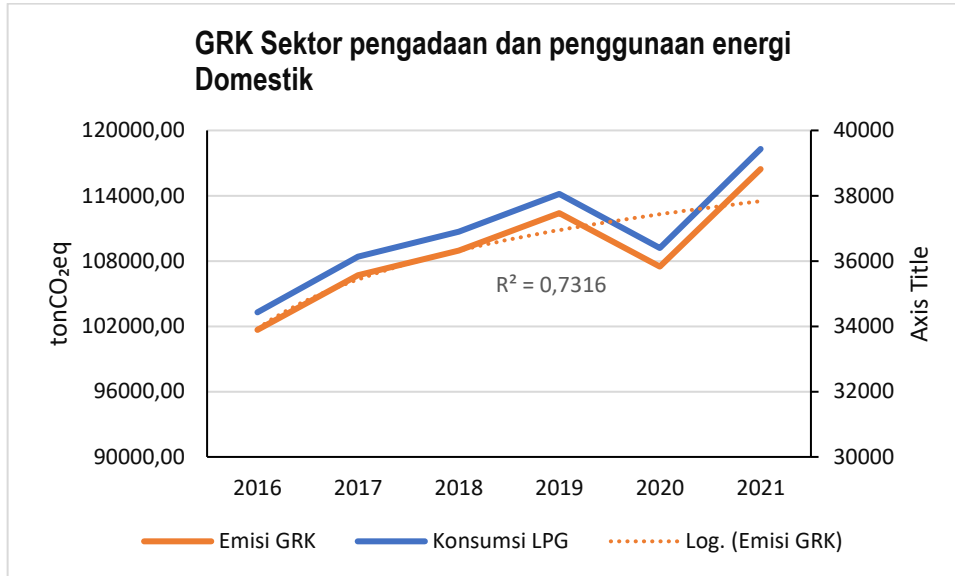


**Gambar 26. Dinamika GRK bahan bakar domestik Kota Surakarta tahun 2019-2022**

Secara umum GRK sektor domestik di Kota Surakarta fluktuatif selama 4 tahun terakhir. Pandemi memberikan tekanan besar yang mereduksi secara signifikan konsumsi energi domestik (kemungkinan karena perhitungan maupun penggunaan tercampur dengan kepentingan perdagangan). Nilai GRK domestik kembali naik pasca pandemi namun mengalami pengendalian lagi (menurun) pada tahun 2022 terutama dari penurunan penggunaan bahan bakar kayu secara signifikan.

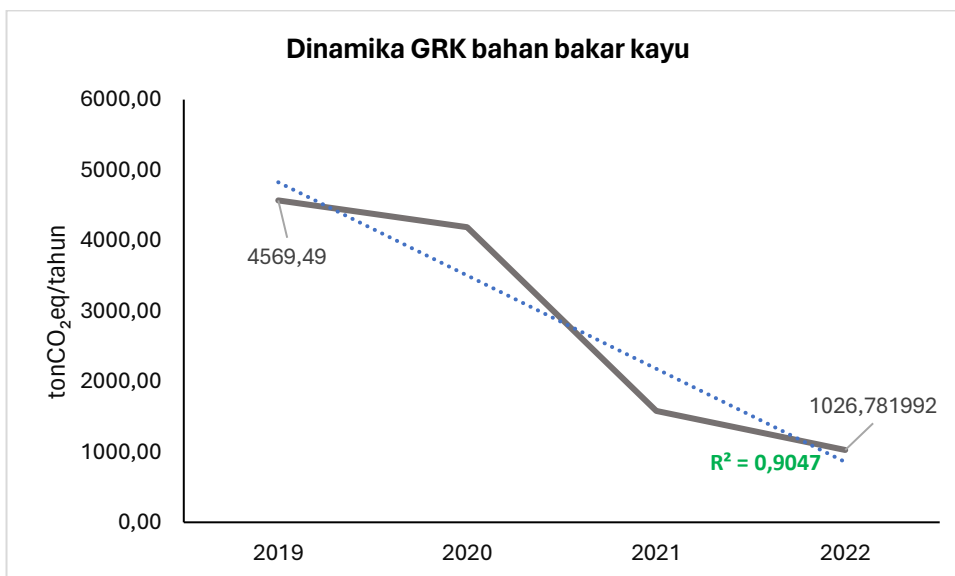
Gambar 27 menunjukkan bahwa jumlah konsumsi LPG memegang peranan mutlak pada fluktuasi GRK domestik. Hal tersebut teraa\mati pada periode inventarisasi lebih panjang (2016-2021). Tren terus mengalami peningkatan mengikuti pola logaritmik ( $r^2 : 0,7316$ ). Determinasi pertumbuhan populasi sangat kuat dan signifikan pada konsumsi LPG maupun GRK dihasilkan. Preferensi LPG sebagai bahan bakar memasak merupakan pilihan ideal untuk menekan GRK pada saat ini.





**Gambar 27. Dinamika GRK konsumsi LPG domestik Kota Surakarta tahun 2016-2021.**

Kondisi penggunaan bahan bakar domestik lain dengan potensi GRK lebih besar cenderung mengalami penurunan. Salah satunya teridentifikasi dari nilai GRK konsumsi kayu bakar. Nilai GRK kayu bakar mengalami tren penurunan signifikan ( $r^2 : 0,9047$ ). Situasi ini menjadi penanda keberhasilan stakeholder lokal dalam melakukan konversi menuju bahan bakar ramah lingkungan.



**Gambar 28. Dinamika GRK konsumsi kayu bakar domestik Kota Surakarta tahun 2019-2021.**

Perhitungan bahan bakar domestik rentan mengalami *underestimated* dengan alasan permasalahan yang sama dengan sektor transportasi. Batas antara Surakarta dengan wilayah hinterland-nya sangat rapat bahkan terkesan tidak lagi memiliki batasan alam yang tegas sehingga memudahkan interaksi terutama di kawasan perbatasan tersebut. Hal ini memungkinkan terjadinya transaksi LPG antar wilayah, terutama masyarakat yang membeli LPG dari wilayah kabupaten lain dan mengkonsumsi di wilayah Surakarta. Konsumsi ini tidak tercatat di manifes penjualan Pertamina namun tetap menghasilkan emisi di wilayah administratif Kota Surakarta.

### **(3) Sektor: Emisi Bangkitan Listrik**

Konsumsi listrik menjadi salah satu aktivitas yang masuk sebagai kategori penggunaan energi. Energi listrik merupakan sumber energi yang dominan digunakan oleh hampir seluruh masyarakat maupun sektor kegiatan. Pertambahan populasi, rumah tangga, jenis aktivitas dan frekwensinya mendorong peningkatan konsumsi listrik oleh masyarakat.

Pada kasus Kota Surakarta, konsumsi listrik merupakan bentuk bangkitan emisi secara tidak langsung. Artinya, emisi konsumsi listrik tidak terjadi pada wilayah inventarisasi, karena ketiadaan pembangkit listrik, namun aktivitas yang berlangsung di dalam kota tersebut membangkitkan potensi emisi pembangkit listrik pada lokasi lain, Hal ini secara tersirat bermakna bahwa konsumsi listrik kota diinventarisasi memiliki andil dalam menyebabkan emisi di kawasan pembangkit. Tidak terjadi pembakaran (combustion) dari aktivitas konsumsi listrik Surakarta, hanya pembangkitan potensi emisi di wilayah lain yang memiliki pembangkit.

Salah satu alasan tetap diperhitungkannya konsumsi listrik meskipun tidak terdapat fasilitas pembangkit adalah sifat dampak emisi yang global. Konsumsi listrik dari bangkitan tidak langsung hanya akan memperhitungkan emisi karbondioksida (CO<sub>2</sub>). Perhitungan emisi dari konsumsi listrik tergolong dalam pendekatan tier II karena selain

menggunakan data aktivitas lokal, juga mengaplikasikan faktor emisi Indonesia. Faktor emisi tersebut bersumber dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang terupdate pada 2014 senilai 0,823 tonCO<sub>2</sub>/MWh. Berikut adalah data konsumsi listrik Kota Surakarta pada setiap sektor kegiatan pada tahun 2022.

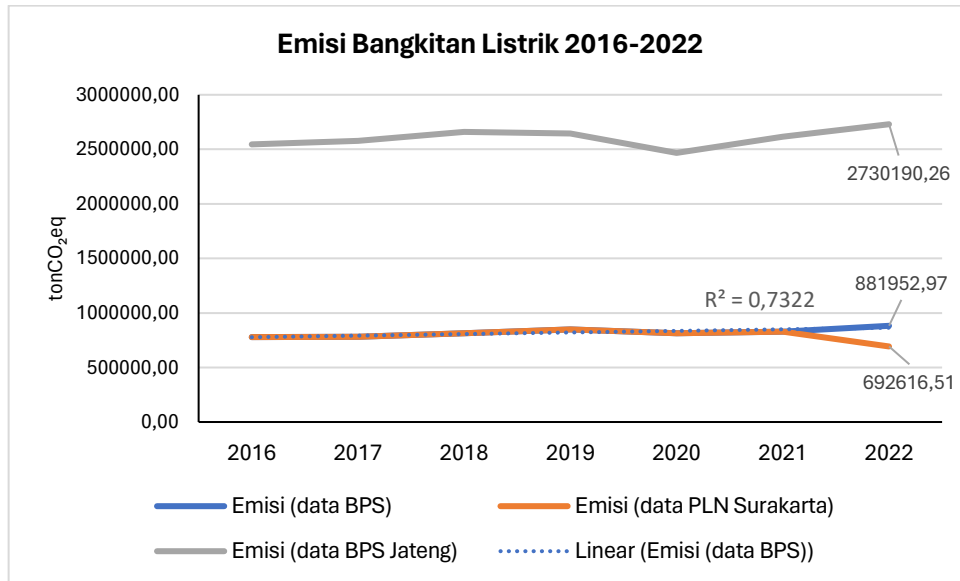
**Tabel 18. Konsumsi listrik berdasarkan kelompok konsumen tahun 2022**

No	Sektor Konsumen	Konsumsi (MWh)
		2022
1	Rumah tangga	402620.69
2	Industri	232749.33
3	Sosial	111258.81
4	Bisnis	272078.43
5	Kantor	52924.53
6	Penerangan Jalan	0
<b>TOTAL KONSUMSI (MWh)</b>		<b>1071631.79</b>

Sumber : BPS Kota Surakarta, 2023

Konsumsi listrik pada tahun 2022 mencapai 1071631,79 MWh. Nilai tersebut masih mengalami tren meningkat sebagai dampak *rebound effect* dari kondisi pada 2020. Pandemi pada tahun 2020 sempat menyebabkan konsumsi listrik mengalami penurunan. Hal tersebut sebagai dampak pembatasan aktivitas dan mobilitas. Nilai tahun 2021-2022 konsumsi listrik kembali meningkat mendekati pola pada tahun terakhir sebelum terjadi pandemi.

Inventarisasi GRK tahun 2023 menerapkan revisi pada konsumsi listrik. Data dalam inventarisasi tahun ini menjadi awal baru perhitungan GRK dari bangkitan listrik yang berbeda dengan tahun-tahun sebelumnya. Data tahun ini menggunakan data konsumsi listrik yang sudah dibatasi dalam layanan wilayah administratif Kota Surakarta. Data sebelumnya *overestimated* karena menggunakan nilai pada wilayah layanan PLN Kota Surakarta. Wilayah layanan tersebut mencakup pula pada kawasan yang sudah berada di luar wilayah administratif Kota Surakarta seperti di sebagian Boyolali, Sukoharjo dan Karanganyar.



**Gambar 29. Dinamika konsumsi listrik Kota Surakarta pada periode tahun 2016-2022 berdasarkan data awal dan koreksi tahun 2023**

Menggunakan data aktivitas konsumsi listrik Kota Surakarta dan faktor emisi lokal, dapat diperhitungkan emisi konsumsi listrik dengan hasil sebagai berikut.

**Tabel 19 Emisi bangkitan listrik Kota Surakarta tahun 2023**

No	Sektor Konsumen	Emisi
		tonCO <sub>2</sub> eq/tahun
1	Rumah tangga	331356.83
2	Industri	191552.69
3	Sosial	91566.00
4	Bisnis	223920.55
5	Pemerintah	43556.89
<b>TOTAL EMISI (tonCO<sub>2</sub>eq/tahun)</b>		<b>881952.96</b>

Sumber : perhitungan data sekunder (2023)

Total GRK yang dikontribusikan oleh bangkitan listrik Kota Surakarta sebesar **881952,96** tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai tersebut menurun signifikan dibandingkan tahun sebelumnya karena dilakukan koreksi data aktivitas. Namun, menggunakan sumber data yang sama menunjukkan kenaikan GRK bangkitan listrik yang meskipun tipis namun memiliki tren meningkat yang signifikan ( $r^2 : 0,7322$ ).



**Gambar 30. Kontribusi GRK bangkitan listrik berdasar sektor konsumen di Kota Surakarta tahun 2022**

Angka bangkitan listrik terutama dikontribusikan oleh sektor industri dan rumah tangga sebagai konsumen terbesar. Konsumsi listrik senantiasa memunculkan nilai tertinggi pada inventarisasi emisi GRK modern, khususnya untuk wilayah perkotaan. Kondisi ini tidak terlepas dari dominasi listrik sebagai sumber energi utama peralatan modern dengan ketergantungan tinggi dari aktivitas antropogenik modern.

GRK bangkitan listrik menunjukkan tren meningkat pada periode 2013-2022 mengikuti persamaan linier ( $r^2 : 0,707$ ). Nilai tersebut menjadi lebih fluktuatif pada periode 5 tahun terakhir karena kondisi pandemi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa populasi dan pemenuhan kebutuhan antropogenik menjadi driving factor. Pressure konsumsi listrik teridentifikasi pada sektor industri dan rumah tangga. Sektor rumah tangga mengalami pembentukan pattern baru sebagai bawaan situasi pandemi. Pola tersebut perlu mendapat perhatian karena terjadi kembali pemborosan konsumsi di rumah tangga yang berarti potensi pembakaran batubara lebih besar.

Listrik dianggap sebagai energi bersih, pada wilayah yang hanya menghasilkan bangkitan. Kondisi tersebut kurang sesuai untuk menggambarkan problema yang muncul pada kawasan berpembangkit

maupun dalam konteks GRK global. Hal ini dikarenakan bahan baku pembangkitan listrik Indonesia yang masih didominasi oleh penggunaan energi non terbarukan seperti batubara. Batubara memiliki karakter menghasilkan emisi relatif besar ditambah dengan produk FABA yang termasuk emisi langsung (partikulat) dan memiliki dampak pada kesehatan. Listrik juga memiliki nilai modal yang efisien karena harga dan kemudahan memperolehnya yang dipandang lebih murah serta mudah dibandingkan sumber energi lain. Alasan tersebut yang menjadikan banyak industri kemudian mengkonversi peralatannya menjadi ber-energi listrik.

Memiliki nilai emisi karbondioksida terbesar tidak serta-merta membuat konsumsi listrik menjadi sebuah kategori kunci dalam mitigasi emisi suatu wilayah. Hal ini tergantung pada keberadaan pembangkit atau pembakaran langsung dari pengadaan listrik di wilayah tersebut. Ketika tidak terdapat pembangkit listrik, maka upaya untuk mereduksi emisi hanya dapat dilakukan melalui himbuan, kampanye, aturan maupun penerapan green architecture yang dapat megupayakan penghematan pemakaian listrik.

Peningkatan bangkitan listrik dari tahun ke tahun menjadi kampanye buruk bagi lingkungan, pada aspek upaya reduksi emisi maupun pemanfaatan sumber daya mineral. Opini ini berkaitan erat dengan jenis bahan bakar yang umum digunakan untuk mengadakan energi listrik tersebut. Kota-kota tanpa pembangkit listrik mungkin saja saat ini tidak mendapat dampak emisi langsung akibat ketiadaan proses pembakaran pada wilayahnya, namun dampak negatif tersebut dipastikan akan terjadi secara global dan dalam jangka lebih panjang.

### **Evaluasi Mitigasi**

Gas rumah kaca (GRK) listrik hanya bersifat bangkitan. Hal ini berarti masyarakat di wilayah administratif Kota Surakarta hanya membangkitkan listrik namun tidak secara langsung terdampak karena tidak ada pembangkit listrik eksisting. GRK bangkitan dapat disisihkan untuk tidak masuk dalam prioritas pengelolaan atau kategori kunci. GRK listrik pada umumnya telah

terhitung pada kawasan berpembangkit sebagai sumber penyediaan energi. Meskipun demikian, karena dampak GRK bersifat global dan cenderung *indirect* maka kampanye dan kebijakan penghematan listrik berbasis bahan bakar fosil tetap harus dilakukan.

PLN bersama stakeholder telah melakukan upaya mitigasi dalam mengurangi GRK listrik. Upaya tersebut dilakukan melalui pendekatan sosial maupun teknologi. Pada pendekatan sosial telah dilaksanakan beragam kampanye menghemat listrik (termasuk earth hour), Kampanye tersebut sempat menunjukkan hasil positif namun kondisi konsumsi diperkirakan kembali meningkat akibat pola pandemi.

PLN Kota Surakarta dalam FGD Kickoff Inventarisasi GRK 2023 menyatakan bahwa saat ini telah menggunakan sumber ramah lingkungan. Sumber pembangkit listrik tersebut antara lain PLTS Atap sesuai permintaan pelanggan, PSEL Putri Cempo (beroperasi pada 30 Oktober 2023) dan dari PLTA di sekitar Kota Surakarta. Nilai bauran energi tersebut berada di kisaran 10% keseluruhan bangkitan listrik Kota Surakarta. Nilai tersebut potensial bertambah kala PSEL Putri Cempo telah beroperasi penuh.

Stakeholder Kota Surakarta saat ini telah mulai menggunakan PLTS Atap sebagai suplai energi listrik yang teregistrasi pada PLN. Registrasi resmi mencatat 43 pelanggan yang menggunakan PLTS Atap dari beragam sektor seperti rumah tangga, perkantoran, sekolah dan fasilitas umum. Keseluruhan daya terkonsumsi dari pemasangan PLTS Atap pada tahun 2022 mencapai 2995400 kWh. Efisiensi penggunaan daya mencapai 14% dari keseluruhan kebutuhan listrik konsumen.

Pihak PLN telah melakukan konversi energi pada industri kecil di Surakarta. Industri industri yang menggunakan bahan bakar kurang ramah lingkungan mayoritas telah berhasil terkonversi ke listrik. Penggunaan listrik pada kawasan tanpa pembangkit memang menjadi solusi energi lebih bersih terutama dibandingkan solid fuel (arang, kayu atau batubara).

PLN memiliki pula program konversi bahan bakar domestik menjadi lebih ramah lingkungan. Program tersebut dalam bentuk hibah kompor

induksi berbasis listrik menggantikan bahan bakar tidak ramah lingkungan seperti kayu. Syarat pemberian kompor induksi tersebut adalah khusus bagi warga yang memiliki kartu identitas Kota Surakarta. Pada tahun 2022 tercatat 978 pelanggan memperoleh kompor listrik. Total energi listrik terkonsumsi dari penggunaan kompor listrik mencapai 119395,98 kWh.

#### **(4) Sektor: Industri**

Industri menjadi salah satu kontributor utama emisi GRK pada era modern, terutama pada kawasan kawasan dengan intensitas kegiatan industri yang masif. Nilai emisi industri bisa menjadi sangat tinggi berkaitan dengan masifnya penggunaan energi berbagai jenis bahan bakar pada beragam peralatan. Seringkali, untuk memenuhi tuntutan kebutuhan dan target produksi, peralatan tersebut digunakan dalam intensitas harian yang sangat tinggi hingga mengkonsumsi energi yang besar

Kota Surakarta tidak banyak memiliki industri besar dan dominan oleh industri berskala kecil dan rumah tangga. Mempertimbangkan fakta tersebut, koleksi data berbasis top down kemungkinan tidak mampu menggambarkan potensi keseluruhan emisi karena tidak terdata lengkapnya industri kecil dan rumah tangga. Secara umum, karakter Kota Surakarta bukan merupakan wilayah industri.

Potensi emisi pada kegiatan industri terbagi dua yaitu (1) combustive emission yang menjadi hasil sampingan (entropi) pembakaran atau penggunaan bahan bakar dan (2) fugitive emission sebagai dampak dari proses industri dan penggunaan produk di dalamnya. Emisi industri yang diperhitungkan dalam kategori penggunaan energi adalah emisi yang tergolong pada kelompok combustive emission.

Data bahan bakar industri diperoleh dari Dinas Koperasi dan Usaha Kecil Menengah Kota Surakarta (2023). Data tersebut kemudian dikombinasikan dengan data direktori industri menengah dan besar dari BPS Kota Surakarta tahun 2020. Kombinasi data tersebut merupakan pendekatan untuk memperoleh nilai GRK penggunaan energi lebih akurat



**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



dari sektor industri karena keterbatasan data. Data tersebut mencantumkan keseluruhan penggunaan energi industri dari bahan bakar cair, padat maupun gas. Jenis bahan bakar yang digunakan pada industri di Kota Surakarta adalah gasoline, diesel (solar), LPG, CNG dan batubara. Berikut adalah data konsumsi bahan bakar (energi) industri Kota Surakarta.

Tabel 20 Konsumsi bahan bakar sektor industri Kota Surakarta 2022

No	Jenis bahan bakar	Konsumsi
		ton/tahun*
1	Gasoline*	265540
2	Diesel <sup>1*</sup>	1133768
3	LPG	243342
4	CNG	33818
5	Batubara	255,216

Sumber : BPS Kota Surakarta (2020), <sup>1</sup>DiskopUMKM Kota Surakarta (2023), bahan bakar cair dalam liter/tahun

Berikut adalah nilai kalor bersih (*net calorific value*) dan faktor emisi yang diaplikasikan dalam perhitungan emisi industri Kota Surakarta.

**Tabel 21 *Net calorific value* (NCV) dan faktor emisi aktivitas industri**

No	Jenis Bahan Bakar	NCV*	Faktor emisi (kg/TJ)			Keterangan
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	Gasoline	0,0348	69300	3	0,6	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category manufacture industry
2	Diesel	0,0387	74100	3	0,6	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category manufacture industry
3	LPG	46,7	63100	1	0,1	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



						category manufacture industry
4	CNG	50	63100	1	0,1	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category manufacture industry
5	Batubara	29,3	94600	10	1,5	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category manufacture industry

Sumber : IPCC, 2006

\*Keterangan untuk satuan NCV, bahan bakar cair (gasoline, diesel dan kerosen) dalam GJ/l, LPG dalam GJ/t, CNG dalam MJ/kg dan batubara dalam GJ/ton

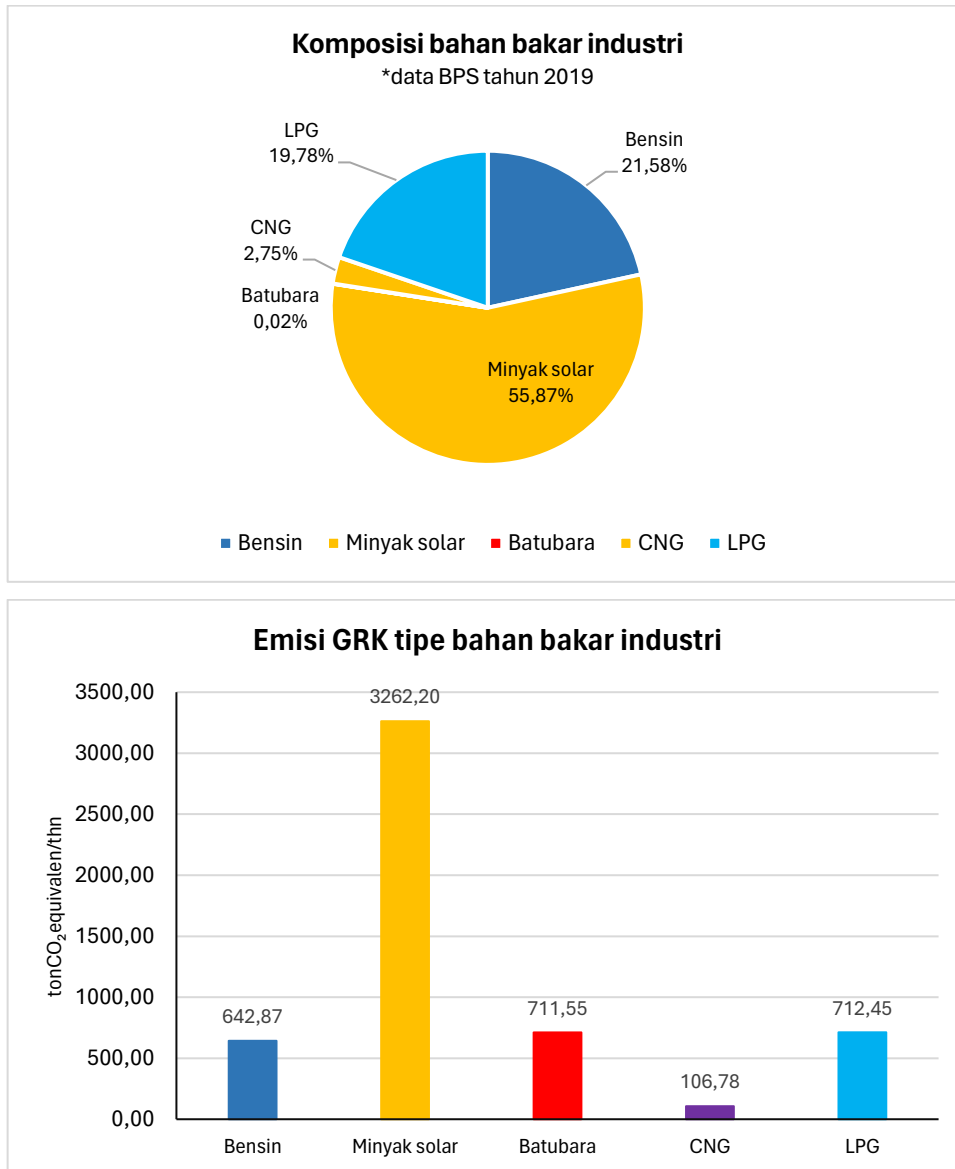
Mengaplikasikan dua variabel utama perhitungan emisi yaitu data aktivitas berupa konsumsi bahan bakar untuk sektor industri tahun 2022 dan faktor emisi, maka dapat diperhitungkan beban emisi GRK sektor industri Kota Surakarta tahun 2023.

**Tabel 22 Emisi aktivitas industri Kota Surakarta tahun 2023**

Jenis bahan bakar	Emisi (ton/th)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
Gasoline	640.57	0.03	0.01	642.8725
Solar	3251.27	0.13	0.03	3262.198
LPG	710.96	0.01	0.00	711.5468
CNG	106.70	0.00	0.00	106.7837
Batubara	707.40	0.07	0.01	712.4501
<b>TOTAL EMISI</b>	<b>5416.90</b>	<b>0.25</b>	<b>0.04</b>	<b>5435.851</b>

Sumber : perhitungan data sekunder (2023)

Emisi GRK yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar sektor industri adalah 5435,851 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai tersebut terutama dari pemakaian bahan bakar cair solar (diesel) dan batubara. Hasil hitungan tersebut terutama dari aktivitas pada industri menengah dan besar.



**Gambar 31. Komparasi konsumsi energi (atas) dan gas rumah kaca dihasilkan (bawah) dari setiap jenis bahan bakar industri Kota Surakarta**

Gas rumah kaca sektor industri didominasi oleh solar. Pada urutan berikutnya dengan nilai nyaris setara terdapat LPG, batubara dan bensin. Kemunculan LPG dan CNG merupakan perwujudan salah satu energi fosil yang ramah emisi. Hal berbeda terjadi pada batubara sebagai jenis bahan bakar boros emisi. Nilai GRK batubara cukup signifikan meski berasal dari penggunaan yang relatif kecil (0,02% dari keseluruhan bahan bakar sektor industri). Hasil tersebut menunjukkan masih terdapat tugas besar untuk

mengoptimalkan konversi energi dengan keberadaan jenis bahan bakar batubara, solar dan bensin.

Kekurangan pada evaluasi GRK industri adalah keterbatasan data. Surakarta dominan oleh tipikal industri kecil hingga menengah. Tipikal ini memiliki jumlah besar dan sebaran lokasi yang cukup merata. Pendataan terhadap penggunaan bahan bakar cukup sulit dilakukan pada kondisi tersebut.

Industri batik merupakan penciri kegiatan di Kota Surakarta. Industri ini terutama didominasi oleh skala kecil dan rakyat yang mengumpul pada beberapa lokasi seperti Laweyan dan Kauman. Industri batik memiliki potensi emisi cukup besar dari penggunaan bahan bakar. Survey dengan metode pengisian kuisioner pada tahun 2022 (untuk data konsumsi tahun 2021) menunjukkan jenis-jenis bahan bakar yang digunakan seperti LPG, minyak tanah, kayu bakar dan arang. Konsumsi kayu bakar masih cukup besar dengan 69,84 ton/tahun dari total 84 unit usaha tersurvey. Secara keseluruhan, industri batik tahun 2022 lampau dapat menghasilkan emisi sebesar 0,161 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Belum ada pembaharuan survey terkait energi terkonsumsi dan GRK yang diproduksi oleh industri batik sakala rumah tangga.

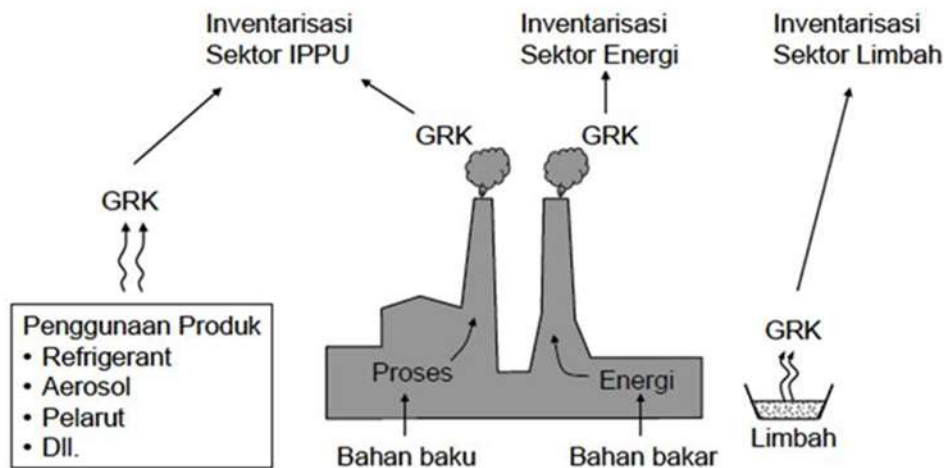
**c. *Industrial Process and Product Uses (IPPU)***

Beban emisi dari kategori proses industri dan penggunaan produk atau IPPU (industrial processes and product uses) membahas mengenai kegiatan kegiatan yang masuk dalam kelompok :

- Emisi GRK yang terjadi selama proses proses / reaksi kimia industri yang tidak berkaitan dengan pembangkitan atau penggunaan energi
- Penggunaan dan pemanfaatan gas GRK dalam proses industri, dan
- Penggunaan bahan bakar dalam proses industri yang tidak terkait dengan penyediaan atau penggunaan energi

(Kementerian Lingkungan Hidup, 2011)

Pada bagian sebelumnya telah dijabarkan bahwa Kota Surakarta bukan merupakan wilayah dengan dominasi aktivitas industri menengah dan besar. Keberadaan industri menengah dan besar jumlahnya terbatas. Hal tersebut didorong salah satunya oleh faktor ketersediaan ruang. Luas wilayah administratif Surakarta yang hanya mencakup 46,72 km<sup>2</sup> tidak menyediakan ruang luas bagi kebutuhan industri besar.



**Gambar 32. Penjelasan pengelompokan emisi GRK pada proses industri menurut kategori kunci IPCC (sumber : Kementerian Lingkungan Hidup, 2011).**

Emisi kategori proses industri dan penggunaan produk (IPPU) pada dasarnya mengestimasi emisi kegiatan industri non-bahan bakar. Beragam industri berproses dengan memanfaatkan bahan atau material pendukung seperti pelumas dan wax (lilin). Beberapa industri spesifik menggunakan lebih banyak bahan atau material kimia dalam industrinya. Pada dasarnya seluruh penggunaan produk maupun proses yang berlangsung akan melibatkan mekanisme pembakaran non-bahan bakar yang potensial berkontribusi emisi ke atmosfer.

Kota Surakarta dengan dominasi utama pada industri tekstil dan makanan (berdasarkan data penggunaan energi) secara sekilas memunculkan dua produk pendukung industri potensial yaitu pelumas dan wax (lilin). Pendataan yang saat ini tersedia adalah terkait jumlah pelumas industri menengah dan besar. Penggunaan pelumas termasuk pada

operasional kendaraan bermotor (*automotive oil*) yang tergolong sebagai *product use*. Kajian pada tahun 2023 ini akan memperhitungkan pula jumlah GRK pelumas pada operasional kendaraan. Metode yang digunakan menggunakan pendekatan *bottom up* berdasarkan data lalu lintas pada jalur jalur *gateways* yang dikonversi untuk 90% panjang jalan di Kota Surakarta.

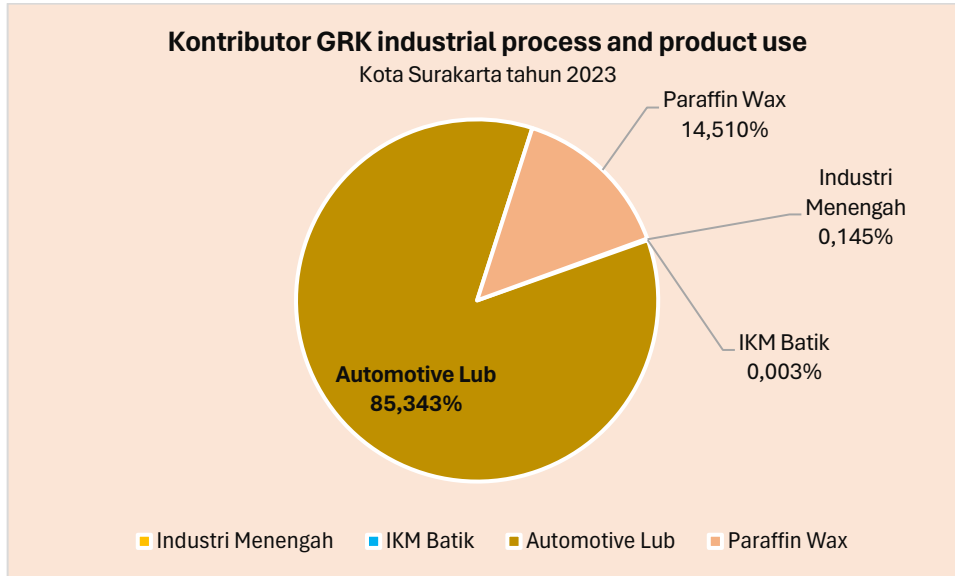
Data terkait penggunaan wax (lilin/parafin) terdokumentasi dari sektor industri batik. Penggunaan bahan wax seharusnya cukup signifikan bila meninjau tekstil sebagai industri dominan. Salah satu industri tekstil khas Surakarta adalah batik yang dipastikan akan mengkonsumsi wax sebagai bagian proses produksinya. Hanya saja, skala industri batik tradisional Kota Surakarta mayoritas adalah skala kecil-rumah tangga yang menyulitkan pendataan secara lengkap terhadap proses dan bahan baku industri.

**Tabel 23. Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori IPPU Kota Surakarta tahun 2023**

No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	
1	Pelumas	8402.22	0	0	8402.22
2	Parafin Waxes	1426.06	0	0	1426.06
<b>TOTAL EMISI</b>		<b>9828.28</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>9828.28</b>

*Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2023)*

Total GRK dari kluster IPPU sebesar **9828,28 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun**. Nilai tersebut diperoleh dari data penggunaan pelumas industri menengah, parafin wax industri batik dan pelumas *automotive*. Kontributor utama kluster IPPU adalah penggunaan pelumas automotif (85,34%). Hasil tersebut wajar mempertimbangkan penggunaan pelumas automotif yang konsisten dan dalam jumlah masif. Pendekatan jumlah kendaraan (*bottom up*) menyebabkan nilai GRK automotif lebih tinggi namun mampu menurunkan nilai ketidakpastian. Nilai GRK IPPU mengalami peningkatan signifikan dibandingkan tahun sebelumnya (naik 312,58%) karena input *automotive lubricants* telah diperhitungkan dalam prediksi seluruh jalan di Kota Surakarta.



**Gambar 32. Kontributor emisi pada kluster industrial process and product use (IPPU) Kota Surakarta tahun 2023**

Data IPPU yang bersumber dari dokumen pemerintah masih cukup terbatas aksesibilitasnya. Mayoritas data untuk perhitungan berasal dari survey primer secara *bottom up*. Konklusi pada kluster ini adalah masih cukup besar pekerjaan rumah terutama dalam organisasi penyediaan data aktivitas.

**(1) Sektor : Konsumsi Pelumas Industri**

Pelumas digunakan di keseluruhan industri pengolahan yang menjadi obyek inventarisasi emisi GRK. Pelumas tidak bersifat kebutuhan primer dalam industri seperti bahan bakar. Namun, penyediaan dan pemakaian pelumas akan turut menjamin kelangsungan mekanisme produksi berkaitan dengan operasional mesin-mesin industri. Data aktivitas penggunaan pelumas Kota Surakarta diperoleh dari survey yang dilaksanakan Disnakerperin pada industri menengah dan besar (2021) dan data Dinkop UKM Perin (2023).

**Tabel 24. Data aktivitas konsumsi pelumas industri Kota Surakarta berdasarkan kelompok industri**

No	Kelompok industri	Konsumsi (liter/tahun)	Konsumsi (ton/tahun)
1	Menengah	25662	24,09

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



	(detail kegiatan tidak diketahui)		
2	Industri Batik	490	0,46
<b>Total konsumsi pelumas</b>		<b>26152</b>	<b>24,55</b>

Sumber : *Disnakerperin (2021). Dinkop UKM Perin (2023)*

Konsumsi pelumas akan berkaitan dengan jumlah peralatan atau mesin yang diberdayakan dalam sebuah proses produksi. Sehingga, konsumsi pelumas pada umumnya tidak berkorelasi kuat dengan jumlah unit industri. Pada konsumsi Kota Surakarta, secara keseluruhan dalam rentang tahun 2022 industri menengah mengkonsumsi 26152 L pelumas atau setara dengan 24,55 ton. Nilai tersebut tentunya tergolong kecil karena keterbatasan data aktivitas.

Perhitungan emisi pelumas mengaplikasikan faktor konversi, *net calorific value* dan konstanta spesifik sebagai substitusi faktor emisi. Oleh sebab itu, perhitungan emisi karbondioksida pelumas tergolong sebagai pendekatan hitung Tier II. Berikut adalah konstanta pendukung perhitungan

**Tabel 25. Faktor konversi, *net calorific value* dan konstanta hitung emisi pelumas**

No	Sumber emisi	Faktor konversi (kg/l)	NCV (GJ/ton)	Kandungan karbon (kgC/GJ)	Faktor ODU	CO <sub>2</sub> /C rasio massa
1	Pelumas	0,9389	40,2	20	0,2	3,67

Sumber data : *Bappeda (2017), faktor konversi dari Canada Statistics, Canada Government (2015)*

Berikut adalah hasil perhitungan emisi pelumas Kota Surakarta berdasarkan pembagian kelompok industri

**Tabel 26. Estimasi emisi penggunaan pelumas industri Kota Surakarta tahun 2023**

No	Kelompok industri	Emisi (tonCO <sub>2</sub> /tahun)	CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
1	Menengah (detail kegiatan tidak diketahui)	14,22	14,22
2	Industri batik	0,27	0,27



<b>TOTAL EMISI</b>	<b>14,49</b>	<b>14,49</b>
--------------------	--------------	--------------

Sumber : perhitungan data sekunder (2023)

Hasil perhitungan menunjukkan emisi dari penggunaan pelumas di Kota Surakarta memiliki nilai yang relatif kecil yaitu 14,49 tonCO<sub>2</sub>e/tahun. Hasil hitungan emisi pelumas memiliki pola berbeda dengan konsumsi bahan bakar. Nilai emisi pada IPPU (penggunaan pelumas) tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah industri namun lebih dipengaruhi oleh kompleksitas peralatan yang digunakan.

## (2) Sektor : Konsumsi Parafin Waxes Industri Batik

Parafin wax atau dikenal di masyarakat lokal sebagai malam, merupakan bahan pendukung utama pada proses pengolahan batik. Hal ini mengaibatkan penggunaan material tersebut cukup besar di Surakarta. Kondisi tersebut selaras dengan jumlah industri batik sebagai sektir kegiatan industri dominan di Surakarta.

Perhitungan terhadap emisi GRK parafin wax diawali dengan terlebih dahulu mengkonversi jumlah konsumsi menjadi metric ton untuk mendapatkan nilai kalor yang terbakar (TJ). Nilai emisi parafin wax diperhitungkann berdasarkan koefisien carbon content dalam bahan tersebut, faktor ODU (*Oxidised During Used*) dan rasio CO<sub>2</sub> dalam C.

**Tabel 27. Faktor konversi, *net calorific value* dan konstanta hitung emisi parafin/wax**

No	Sumber emisi	Faktor konversi (mT/ton)	NCV (TJ/1000mT)	Kandungan karbon (kgC/GJ)	Faktor ODU	CO <sub>2</sub> /C rasio massa
1	Parafin Wax	0,907	40,2	20	0,2	3,67

Sumber data : Bappeda (2017), faktor konversi dari Canada Statistics, Canada Government (2015)

Berikut adalah hasil perhitungan emisi untuk penggunaan parafin wax pada industri batik Kota Surakarta

**Tabel 28. Estimasi emisi penggunaan parafin/wax industri batik Kota Surakarta tahun 2023**

No	Kelompok industri	Emisi (tonCO <sub>2</sub> /tahun)	CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
1	Batik	1426,06	1426,06
<b>TOTAL EMISI</b>		<b>1426,06</b>	<b>1426,06</b>

*Sumber : perhitungan data sekunder (2023)*

Total emisi yang dihasilkan oleh penggunaan parafin dan wax pada proses produksi batik di Kota Surakarta mencapai 1426,06 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai ini jauh diatas emisi pelumas yang menunjukkan signifikansi konsumsi parafin/wax pada proses produksi batik.

### **(3) Pelumas Automotive**

Pelumas automotive merupakan variabel IPPU pada product use yang digunakan secara masif. Jumlah automotive lubricant akan dipengaruhi oleh jenis dan jumlah kendaraan bermotor yang beroperasi. Pelumas automotif merupakan variabel IPPU yang lebih dinamis karena berupa product use, bukan industrial process seperti pelumas industri dan parafin. Faktor pressure GRK dari pelumas automotif cukup kompleks seperti mileage, maintenance kendaraan, style berkendara hingga karakter lingkungan perkotaan.

Perhitungan GRK pelumas automotif menggunakan data bottom up karena kesulitan akses data sekunder. Data bottom up berupa perhitungan LHR pada 7 ruas jalur masuk Kota Surakarta. Perhitungan tersebut dilakukan secara penuh sepanjang tahun 2022 dengan periode pantau 24 jam dengan memanfaatkan rekaman CCTV Dishub Kota Surakarta. Basis bottom up berupa data riil lalu lintas harian akan memberikan ketidakpastian hasil lebih rendah dibandingkan data penjualan (sales product). Perhitungan GRK pelumas automotif mengaplikasi formula dari EMEP EEA Corinair tahun 2019.

$$E_i = \sum_j (\sum_m (FC_{j,m} \times EF_{i,j,m}))$$

Dengan

$E_i$  : emisi pelumas (ton/tahun)

$FC_{j,m}$  : konsumsi kendaraan jenis j menggunakan jenis bahan bakar m (kg)

$EF_{i,j,m}$  : faktor emisi kendaraan j menggunakan jenis bahan bakar m (g/kg)

Formula tersebut merupakan pendekatan hitung GRK pelumas (variabel emisi CO<sub>2</sub>) dengan pendekatan Tier I. Faktor emisi telah tersedia pada dokumen pedoman yang sama dengan detail sebagai berikut

**Tabel 29. Faktor emisi penggunaan pelumas kendaraan**

No	Kategori kendaraan	Jenis bahan bakar	Mean Faktor emisi (g/kg)
1	Passengers cars	Gasoline	8,84
		Diesel	8,74
2	HDV	Gasoline	2,54
		Diesel	3,31
3	L category (sepeda motor)	Gasoline	53,8

*Sumber : EMEP EEA Corinair 2019*

Menggunakan ketersediaan data lalu lintas harian rata rata dan faktor emisi diperoleh nilai GRK pelumas kendaraan bermotor Kota Surakarta sebagai berikut.

**Tabel 30. Hasil perhitungan GRK pelumas kendaraan bermotor Kota Surakarta tahun 2023**

No	Jalan pemantauan	Panjang ruas pantau (Km)	Emisi tahunan (tonCO <sub>2</sub> eq/tahun)
1	Slamet Riyadi	1.26	41.91
2	Yos Sudarso	0.77	31.61
3	Adi Sumarmo	1.76	44.85
4	Ringroad	5.49	138.73
5	Sutami dan Sutarto	1.92	132.53
6	Adi Sucipto	2.86	102.19
7	Rajiman 2 way	0.974	33.71
<b>Total GRK pelumas kendaraan bermotor</b>		<b>15.04</b>	<b>525.52</b>

*Sumber : perhitungan data primer (2023)*

Total GRK pelumas kendaraan bermotor mencapai 525,52 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai tersebut baru berasal dari 7 luas jalan yang dianggap sebagai pintu masuk kota dan tersedia data LHR. Akumulasi panjang jalan

terpantau dari 7 gateways adalah 15,04 km. Hal ini berarti rata-rata GRK penggunaan pelumas pada gateways mencapai 34,95 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai GRK pelumas pada masing-masing jalan ditentukan oleh jumlah dan jenis kendaraan. Nilai tertinggi teridentifikasi pada kombinasi Jl Sutami dan Ringroad Mojosongo sedangkan terendah pada Jl Dr Rajiman segmen Pajang (Pasar Jongke). Nilai tersebut kemudian dapat dikonversikan menjadi nilai konsumsi pada keseluruhan jalan di Surakarta melalui multiplikasi GRK/km dgn total panjang jalan. Nilai panjang jalan yang digunakan hanya 270 km setara 97% keseluruhan untuk mereduksi overestimate. Hasil konversi mendapatkan nilai GRK penggunaan pelumas automotif di Kota Surakarta selama tahun 2022 mencapai **8387,73 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun**

Hasil dari pemilahan GRK pelumas kendaraan menguatkan bahwa aktivitas komuter memegang peranan penting. Secara spesifik terlihat jelas bahwa problematika komuter terletak pada pemilihan moda transportasi. Kecenderungan penggunaan moda pribadi nampak pada dominasi GRK pelumas sepeda motor pada saat weekdays.

**d. Agrikultural, Kehutanan dan Penggunaan Lahan (AFOLU)**

Kluster agrikultur kehutanan dan penggunaan lahan (AFOLU) terutama menjadi penyumbang utama bagi emisi metana. Metana memiliki korelasi erat dengan penggunaan dan pengelolaan lahan terutama untuk budidaya padi yang senantiasa tergenang. Pada sistem pertanian yang belum memenuhi kaidah lingkungan, kegiatan pembakaran sisa panen dan penggunaan urea secara berlebihan untuk memacu produksi akan menghasilkan tambahan emisi karbondioksida. Hal tersebut diperparah dengan pola penanaman yang terkesan memaksakan lahan sawah untuk terus berproduksi sepanjang tahun tanpa jeda penanaman.

Emisi dari sektor pertanian dihasilkan oleh aktivitas peternakan, pengolahan tanah, pengolahan lahan hingga penggunaan pupuk, terutama pupuk urea. Peternakan menjadi kegiatan komplementer pada masyarakat agraris. Peternakan dan pertanian memiliki keterkaitan simbiosis yang

saling mendukung dan menguntungkan sehingga biasanya intensitas keduanya akan saling selaras.

Beban emisi dari sektor kehutanan umumnya disebabkan oleh terjadinya kebakaran hutan baik karena kesengajaan (untuk keperluan pembukaan lahan) maupun faktor bencana alam (musim panas, kekeringan). Beban emisi dari penggunaan lahan adalah emisi alami yang dihasilkan oleh suatu peruntukkan lahan yang dihitung secara berkala dari tahun ke tahun, mengikuti dinamika perubahannya dengan memperhitungkan stok karbon pada masing-masing peruntukan.

Perubahan penggunaan lahan menjadi peruntukan antropogenik akan mengurangi kesetimbangan karbon keluar dan karbon masuk (terserap). Pembangunan lebih banyak peruntukkan antropogenik akan mengurangi lahan alami termasuk vegetasi. Pada titik inilah kemudian serapan yang bisa mengurangi beban emisi GRK berubah menjadi surplus tambahan GRK terutama pada parameter gas CO<sub>2</sub>.

Kota Surakarta memiliki profil non-agraris dengan sebagian besar masyarakat beraktivitas pada sektor antropogenik modern seperti : jasa, perdagangan dan pariwisata. Kondisi tersebut diperkuat dengan fakta terbatasnya luas lahan pertanian dan perkebunan lahan kering. Surakarta tidak memiliki kawasan hutan primer maupun sekunder. Adapun hutan kota merupakan kawasan bervegetasi sempit yang ditetapkan statusnya melalui peraturan pemerintah setempat, namun secara fungsi ekologis kawasan tersebut jelas memiliki peran jauh di bawah hutan yang sebenarnya. Kondisi tersebut menyebabkan potensi emisi sektor agrikultural dan kehutanan di Kota Surakarta akan bernilai minimal. Penggunaan lahan menyiratkan bahwa daya dukung alami terhadap emisi karbon kemungkinan telah terlampaui sehingga tidak lagi mampu berperan sebagai penyerap bahkan akan turut berkontribusi emisi ke atmosfer.

**Tabel 31. Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori agrikultur, kehutanan dan penggunaan lahan**

No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)	CO <sub>2</sub> eq
----	--------------	-------------------------	--------------------

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



		<b>CO2</b>	<b>CH4</b>	<b>NO2</b>	<b>(ton/tahun)</b>
1	Peternakan				
a	Fermentasi enterik	0.00	18.78	0.00	394.46
b	Pengolahan kotoran	0.00	1.19	0.42	155.78
2	Pertanian	0.00	0.00	0.00	0.00
3	Penggunaan lahan	59657.00	0.00	0.00	59657.00
<b>TOTAL EMISI</b>		<b>59657.00</b>	<b>19.98</b>	<b>0.42</b>	<b>60207,24</b>

Sumber : perhitungan data sekunder (2023)

Total emisi GRK kategori AFOLU mencapai **60207,24** CO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai tersebut mengalami penurunan 0,8 % dibandingkan tahun sebelumnya. Penurunan didorong oleh berkurangnya lahan pertanian Surakarta. Saat ini Kota Surakarta telah menghapus status sawah lestari yang memudahkan alih fungsi lahan pertanian. Kontributor utama GRK AFOLU adalah penggunaan lahan yang sejak tahun 2018 telah defisit dalam keseimbangan serapan karbon. Tanpa melibatkan alih fungsi lahan, sektor peternakan menjadi kontributor utama.

Pada kategori ini, karbondioksida tetap muncul sebagai emisi dominan menunjukkan karakter khas Surakarta dengan kegiatan urban modernnya. Hal tersebut disumbangkan oleh perubahan penggunaan lahan kota menjadi peruntukkan antropogenik. Penurunan lahan pertanian dan keterbatasan lahan ternak menjadikan emisi dari dua kegiatan tersebut menjadi sangat kecil.

Bagi Kota Surakarta, AFOLU bukan menjadi kategori utama karena kegiatan antropogenik telah sepenuhnya bergeser ke aktivitas modern. Kegiatan pertanian sangat terbatas terbukti dengan sedikit dan semakin mengecilnya jumlah lahan sawah lokal. Hal ini akan berpengaruh besar pada aktivitas pendukung yang biasanya berjalan secara beriringan seperti peternakan, pengolahan sawah dan aplikasi bahan bahan pendukung budidaya tanaman.

Pada inventarisasi tahun 2023 ini sektor pertanian disepakati untuk tidak lagi diperhitungkan. Pengabaian tersebut dengan alasan bahwa status sawah lestari telah dihapus dengan realitas lahan pertanian Kota Surakarta memiliki luasan sangat sempit. Penghapusan sawah lestari berkonsekuensi

pada konversi lahan-lahan sawah menjadi peruntukan lain sehingga dipandang tidak lagi prospektif sebagai sumber GRK.

Kluster AFOLU memunculkan sektor penggunaan lahan sebagai emiter terbesar. Hal ini merupakan konsekuensi ketika aktivitas pertanian dihapus. Aktivitas pertanian menyumbang GRK dari beragam sub kegiatan yang dilakukan seperti : aplikasi kapur, aplikasi pupuk (urea maupun organik), aplikasi dolomit, pengolahan tanah hingga pembakaran sisa panen. Hanya saja, kondisi riil di Kota Surakarta menunjukkan lahan pertanian memiliki luasan sangat terbatas (kecil). Luasan yang ada pun memiliki kerentanan tinggi untuk beralih fungsi menjadi lahan terbangun karena status sawah lestari telah dicabut. Nilai sektor penggunaan lahan cenderung besar karena kemampuan serapan karbon tidak lagi mengimbangi pada potensi karbon yang dilepas oleh penggunaan lahan eksisting.

Kota Surakarta menghadapi krisis fungsi ekosistem vegetasi. Alih fungsi lahan yang tinggi dan keterbatasan lahan di wilayah administrasi Kota Surakarta menekan penyediaan vegetasi. Vegetasi berperan sebagai wahana penyerap karbon alami. Konsekuensi dari kondisi tersebut adalah ketimpangan antara beban emisi dan kemampuan serapan dengan kecenderungan demand serapan melebihi supply. Kondisi saat ini membuat penggunaan lahan cenderung mengemisikan daripada menyerap karbon dengan asumsi nilai mencapai Secara langsung bermakna pada pelampauan daya dukung siklus karbon natural di Kota Surakarta.

### **(1) Sektor: Peternakan**

Pada dasarnya, perhitungan emisi aktivitas peternakan bergantung pada jumlah ternak dalam jangka satu tahun. Ternak dikelompokkan dalam dua grup utama yaitu non unggas dan unggas. Perhitungan emisi CH<sub>4</sub> peternakan dibagi dua yaitu emisi fermentasi enterik dan pengelolaan kotoran. Emisi fermentasi enterik khusus diperhitungkan untuk hewan memamah biak atau ruminansia (non-unggas) sedangkan emisi pengelolaan kotoran untuk keseluruhan jenis ternak. Emisi pengelolaan kotoran akan memanfaatkan pengelompokkan jenis ternak. Penentuan

jumlah ternak tahunan pada unggas akan memperhitungkan umur rata-rata satu periode pembudidayaan (hari).

$$\mathbf{Elent = \Sigma pop(ekor)_i \times EFent(i) \dots (1)}$$

$$\mathbf{Elwas = \Sigma pop(year)_i \times EFwas(i) \dots (2)}$$

$$\mathbf{Elt = Elent + Elwas}$$

Dengan

Elent : Emisi fermentasi enterik (ton/year)

Elwas : Emisi pengelolaan kotoran (ton/year)

Elt : Total livestock emission (ton/year)

$\Sigma pop(ekor)_i$  : Jumlah keseluruhan ternak (ekor)

$\Sigma pop(year)_i$  : Jumlah keseluruhan ternak (ekor/tahun)

EFent(i) : Faktor emisi fermentasi enterik

EFwas(i) : Faktor emisi pengelolaan kotoran

Total emisi peternakan secara umum merupakan perkalian antara jumlah ternak (tahunan atau ekor) dengan faktor emisi masing masing ternak, untuk kelompok emisi fermentasi enterik maupun emisi pengelolaan kotoran (Dotse, et al, 2016).

**Tabel 32. Data aktivitas peternakan di Kota Surakarta pada tahun 2022**

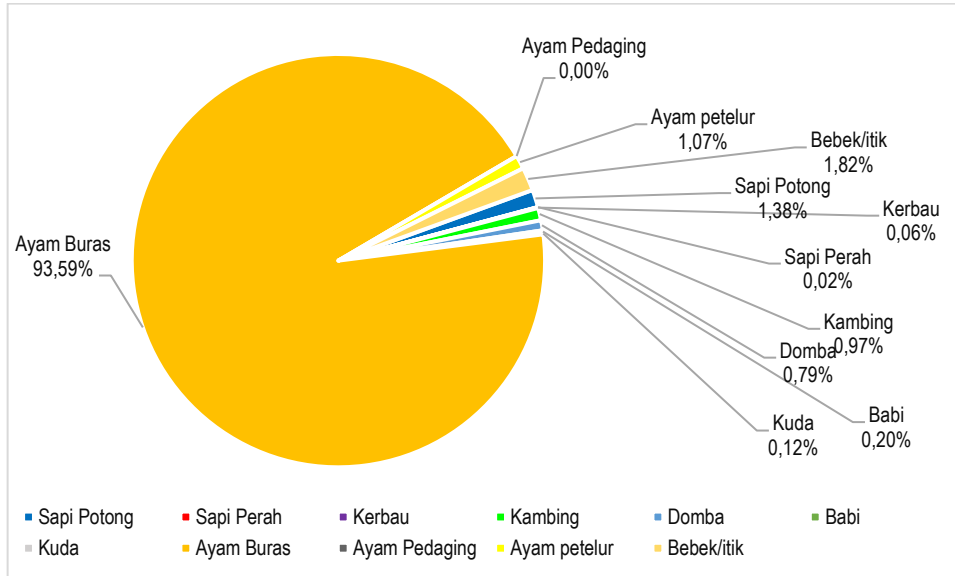
No	Jenis ternak budidaya	Jumlah (ekor)	Umur rata-rata (hari) <sup>1</sup>	Populasi tahunan (ekor)
1	Sapi Potong	324		324
2	Sapi Perah	4		4
3	Kerbau	13		13
4	Kambing	228		228
5	Domba	185		185
6	Babi	46		46
7	Kuda	27		27
8	Ayam Buras	21966	180	10833
9	Ayam Pedaging	0	35	0
10	Ayam petelur	250	600	411
11	Bebek/itik	427	600	702
<b>Total peternakan</b>		<b>23470</b>		<b>12772</b>



*Sumber : Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian (2023)*

Kota Surakarta memiliki beberapa fasilitas peternakan. Fasilitas tersebut berada pada wilayah terbatas karena mayoritas lahan tidak lagi mendukung sebagai kawasan pengembangan peternakan. Budidaya ternak memang dilaksanakan bukan sekedar sebagai fasilitas transit sebelum distribusi lanjut atau penjagalan. Inventarisasi tahun ini memperoleh durasi budidaya ternak yang lebih panjang dibandingkan nilai default IPCC di Kota Surakarta, secara khusus pada kelompok unggas. Lama budidaya tersebut akan menentukan besaran emisi pengelolaan kotoran.

Jumlah ternak di Kota Surakarta adalah 23470 ekor, menurun dibandingkan pendataan tahun sebelumnya sejumlah 26178 ekor. Konversi dengan hari budidaya pada masing-masing jenis ternak unggas menunjukkan jumlah ternak berpotensi GRK adalah 12772 ekor. Peternakan Kota Surakarta didominasi oleh kelompok unggas (95,48%), terutama ayam buras (93,59%). Ternak kelompok unggas tidak membutuhkan ruang luas untuk budidaya sehingga dianggap masih layak dibudidayakan pada wilayah perkotaan sempit seperti Surakarta. Jumlah ternak berukuran besar seperti ruminansia terbatas, hanya tersedia pada wilayah tertentu. Ternak jenis tersebut pada umumnya hanya transit di Kota Surakarta. Sebagian ternak ruminansia di Kota Surakarta hanya menunggu proses untuk masuk ke rumah pemotongan. Ternak ruminansia terbesar adalah sapi potong (1,38%).



**Gambar 34. Komposisi jenis ternak Kota Surakarta tahun 2022**

Potensi emisi pada sektor peternakan berasal dari fermentasi enterik dan pengolahan kotoran (terolah maupun terbuang tanpa pengolahan). Fermentasi enterik berasal dari metabolisme alami ruminansia akibat tidak efisiennya pengolahan energi dari asupan makanan ternak. Fermentasi enterik menghasilkan emisi metana ( $CH_4$ ), umumnya dalam jumlah signifikan karena bersumber dari aktivitas konsisten dan terjadi pada seluruh individu ruminansia. Perhitungan emisi metana peternakan mengaplikasikan faktor emisi sebagai berikut.

**Tabel 33. Faktor emisi metana dari fermentasi enterik dan pengolahan kotoran pada sektor peternakan**

No	Parameter emisi	Nilai Faktor emisi	Satuan	Keterangan
<b>Fermentasi enterik</b>				
1	Sapi potong	47	kgCH <sub>4</sub> /ekor	IPCC, 2006
2	Sapi perah	61		
3	Kerbau	55		
4	Kambing	5		
5	Domba	5		
6	Babi	1		
7	Kuda	18		

Pengelolaan kotoran					
1	Sapi potong	1	kgCH <sub>4</sub> /ekor	IPCC, 2006	
2	Sapi perah	31			
3	Kerbau	2			
4	Kambing	0,2			
5	Domba	0,22			
6	Babi	7			
7	Kuda	2,19			
8	Ayam kampung	0,02			
9	Ayam pedaging	0,02			
10	Ayam petelur	0,03			
11	Bebek/itik	0,03			

*Sumber : IPCC, 2006, Kementerian Lingkungan Hidup, 2011*

Pengolahan kotoran menjadi emisi peternakan yang menghasilkan tidak hanya metana namun juga nitrogen dioksida. Hanya sayangnya kompleksitas data usia maupun asal ternak tidak tersedia di Kota Surakarta sehingga faktor emisi menggunakan pendekatan default IPCC. Perhitungan emisi nitrogen dioksida peternakan mengaplikasikan faktor emisi sebagai berikut.

**Tabel 34. Faktor emisi nitrogen dioksida dari emisi langsung pengolahan kotoran pada sektor peternakan**

No	Jenis Ternak	Laju eksresi N (kgN/ton/hari)	Rataan massa (kg)	Eksresi (N/ekor/hari)	Faktor emisi
1	Sapi potong	0,34	319	0,10846	0,02
2	Sapi perah	0,47	350	0,1645	0,02
3	Kerbau	0,32	380	0,1216	0,02
4	Kambing	1,17	45	0,05265	0,02
5	Domba	1,37	40	0,0548	0,02
6	Babi	0,5	28	0,014	0,02
7	Kuda	0,46	550	0,253	0,02
8	Ayam kampung	0,82	0,9	0,000738	0,001
9	Ayam pedaging	1,1	0,9	0,00099	0,001
10	Ayam petelur	0,82	1,8	0,001476	0,001
11	Bebek/itik	0,83	2,7	0,002241	0,001

*Sumber : IPCC, 2006, Kementerian Lingkungan Hidup, 2011 dikompilasi dalam kalkulator GIZ PAKLIM*

**Tabel 35. Faktor emisi nitrogen dioksida dari emisi tidak langsung pengolahan kotoran pada sektor peternakan**

No	Jenis Ternak	Kehilangan nitrogen (%)	Faktor emisi
1	Sapi potong	30	0,01
2	Sapi perah	7	0,01
3	Kerbau	30	0,01
4	Kambing	12	0,01
5	Domba	12	0,01
6	Babi	25	0,01
7	Kuda	12	0,01
8	Ayam kampung	40	0,01
9	Ayam pedaging	40	0,01
10	Ayam petelur	40	0,01
11	Bebek/itik	40	0,01

*Sumber : IPCC, 2006, Kementerian Lingkungan Hidup, 2011 dikompilasi dalam kalkulator GIZ PAKLIM*

Berikut ini adalah hasil perhitungan beban emisi aktivitas peternakan di Kota Surakarta dengan memperhitungkan data aktivitas dan faktor emisi yang tersedia.

**Tabel 36. Hasil inventarisasi gas rumah kaca sektor peternakan tahun 2023**

No	Proses	Emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
1	Fermentasi enterik	0.00	18.78	0.00	394.46
2	Pengolahan Kotoran	0.00	1.19	0.42	155.78
<b>TOTAL EMISI</b>		<b>0.00</b>	<b>19.98</b>	<b>0.42</b>	<b>550.24</b>

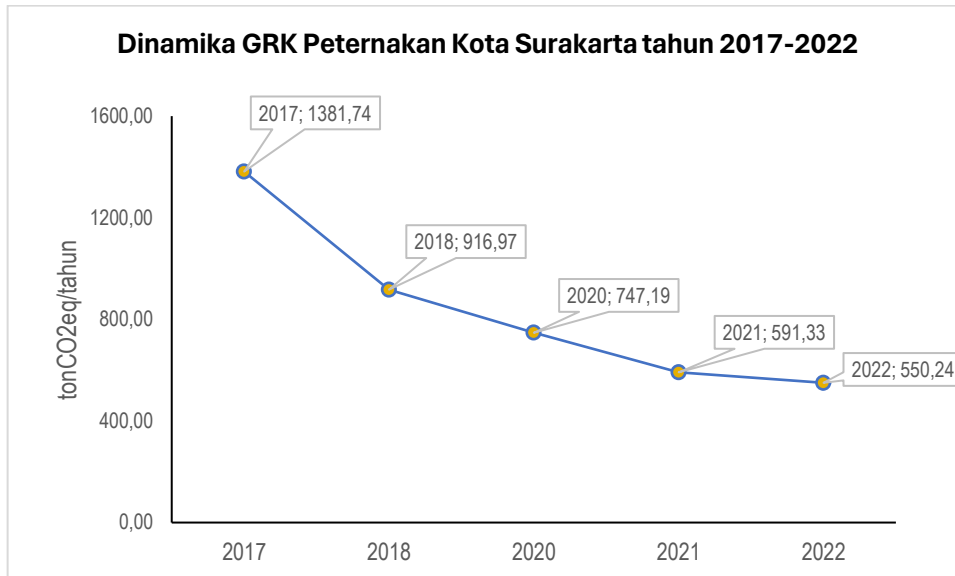
*Sumber : perhitungan data sekunder (2023)*

Total GRK sektor peternakan pada tahun 2023 setara dengan 550,24 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun dengan mayoritas adalah kontribusi metana. Sub sumber utama pada GRK peternakan adalah fermentasi enterik ruminansia yang mencapai 394,46 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai GRK pengolahan kotoran menjadi cukup besar karena hari budidaya pada kelompok ternak unggas yang lebih

panjang dibandingkan default IPCC. Secara umum kegiatan peternakan menjadi salah satu kontributor utama emisi kluster AFOLU yang memang aktivitasnya terbatas di perkotaan Surakarta.

Nilai emisi nitrogen dioksida ( $N_2O$ ) sebesar 0,42 ton/tahun dengan keseluruhan berasal dari pengolahan kotoran. Pada emisi pengolahan kotoran berlaku prinsip semakin berat massa hewan, semakin besar konsumsi makanan dan semakin besar produksi kotorannya akan menginisiasi emisi dalam jumlah lebih besar. Emisi GRK tidak dapat diatasi, hanya dapat dikurangi atau dengan memanfaatkan potensi emisi menjadi material yang lebih bermanfaat bagi kehidupan atau lingkungan. Sebagai contoh adalah upaya konversi kotoran ternak menjadi pupuk kandang serta biogas, energi alternatif.

Nilai GRK Peternakan mengalami penurunan 6,95% dibandingkan tahun sebelumnya selaras dengan penurunan jumlah ternak. Hal ini terjadi karena penurunan jumlah ternak terutama ruminansia. Penurunan jumlah tersebut didorong oleh beragam faktor seperti keterbatasan lahan budidaya dan penggembalaan, keterbatasan pakan hingga kesediaan menjadi peternak yang rendah dibandingkan profesi lain. Tren penurunan pada emisi peternakan menunjukkan bahwa lahan untuk pengembangan kegiatan agrikultur semakin terbatas oleh dinamika alih fungsi lahan terbangun. Tren GRK peternakan Kota Surakarta cenderung konsisten mengalami penurunan pada 2017-2022 ( $r^2 : 0,980$ ). Tren tersebut menunjukkan pola menurun yang cenderung melandai sejak 2021 mengindikasikan nilai terendah yang bisa dipertahankan sekaligus maksimum kegiatan yang dapat berlangsung. Peternakan tetap akan berlangsung di wilayah Kota Surakarta namun memiliki pribablitas tinggi untuk terus menurun hingga level tertentu.



**Gambar 35. Tren GRK peternakan di Kota Surakarta pada 2017-2022**

## (2) Sektor: Pertanian

Pertanian menjadi salah satu aktivitas utama dalam kategori AFOLU. Timbulan emisi dari aktivitas pertanian dapat dihasilkan oleh sub aktivitas : pengolahan sawah, pembakaran biomassa, aplikasi urea dan pengolahan lahan. Variabel emisi GRK yang dihasilkan dari setiap sub aktivitas tersebut berbeda-beda. Beberapa diantaranya menghasilkan lengkap tiga variabel dengan CO<sub>2</sub> mendominasi emisinya. Namun, beberapa lainnya hanya menghasilkan emisi CH<sub>4</sub> dan NO<sub>2</sub>.

Lahan pertanian, terutama persawahan memiliki dua muka mata uang bagi lingkungan perkotaan. Pada satu sisi, pembudidayaan padi potensial meningkatkan emisi metana dan semakin buruk ketika dilakukan tanpa penjemuran. Sisi lain adalah aspek positif persawahan sebagai ruang terbuka hijau (RTH) dan sekecil apapun mampu memberikan sumbangsih pada serapan karbon perkotaan.

Kota Surakarta tidak berciri agraris dan lebih ada kawasan urban modern. Artinya adalah kegiatan pertanian tidak menjadi nadi perekonomian utama masyarakat Surakarta. Keberadaan lahan pertanian

semakin sempit dan terbatas akibat alih guna lahan untuk kepentingan antropogenik modern. Data dari Dinas Pertanian, Ketahanan Pangan dan Peternakan dan Perikanan Kota Surakarta menunjukkan penurunan luas lahan pertanian keseluruhan hanya tersisa 42,5 ha (sebelumnya 57,7 ha) yang terbagi menjadi 32,5 ha merupakan sawah tergenang dan sisanya adalah sawah tidak tergenang. Lahan tergenang lebih banyak mengalami alih fungsi. Luasan tersebut seluruhnya produktif sebagai lahan pertanian. Luas tersebut potensial berkurang pada masa depan karena ketiadaan status sawah lestari maupun kebutuhan lahan antropogenik yang tinggi.

Pertanian disepakati untuk dikeluarkan dari daftar kegiatan yang diperhitungkan dalam inventarisasi GRK Kota Surakarta tahun 2023. Hal tersebut disepakati oleh seluruh peserta FGD Kickoff Inventarisasi GRK tahun 2023. Pencoretan tersebut mempertimbangkan pada ketersediaan lahan pertanian yang terbatas dan semakin menurun pada wilayah administratif Surakarta. Selain itu, status sawah lestari telah dihapus dalam RTRW dan regulasi terbaru. Penghapusan status tersebut berkonsekuensi pada keleluasaan dalam alih fungsi lahan. Keterbatasan lahan kosong di wilayah administratif Kota Surakarta akan mempercepat progress alih fungsi lahan. Kondisi tersebut mendorong pemerintah memandang GRK pertanian tidak lagi relevan untuk diperhitungkan karena sumber penghasilnya semakin kecil dengan tren akan menghilang dalam periode waktu tidak lama.

### **(3) Sektor: Penggunaan Lahan**

Penggunaan lahan menunjukkan potensi emisi yang dihasilkan atau diserap. Menurut IPCC (2006) terdapat 6 kategori umum penggunaan lahan pada suatu wilayah antara lain adalah :

1. Lahan Hutan. Mencakup semua lahan dengan vegetasi berkayu atau struktur vegetasi di luar katoegori hutan yang memiliki potensi memenuhi kriteria ambang batas sebagai lahan hutan

2. Lahan pertanian. Meliputi lahan untuk penanaman tanaman pangan, termasuk sawah dan agrofresti yang struktur vegetasinya di bawah ambang batas kriteria lahan hutan
3. Padang rumput dan savana. Mencakup padang penggembalaan dan padang rumput yang tidak termasuk lahan pertanian. Termasuk pula vegetasi berkayu bukan rumput seperti semak dan herba. Berdasarkan fungsi mencakup semua padang rumput yang dikelola sampai sebagai rekreasi, lahan pertanian hingga silvi pastur.
4. Lahan basan (rawa, gambut, sungai, danau dan waduk). Mencakup lahan dari pengembangan gambut atau tanah yang ditutupi atau jenuh oleh air, baik temporer maupun sepanjang tahun.
5. Pemukiman dan infrastruktur. Mencakup keseluruhan lahan yang dikembangkan atau berkembang atau mengalami perubahan sebagai pemukiman dan infrastruktur masyarakat (termasuk untuk kepentingan transportasi).
6. Lahan lainnya. Mencakup lahan tanah terbuka, lahan bersalju, lahan berbatu, lahan ekstrim lainnya yang tidak dapat dikelompokkan dalam 5 kategori sebelumnya.

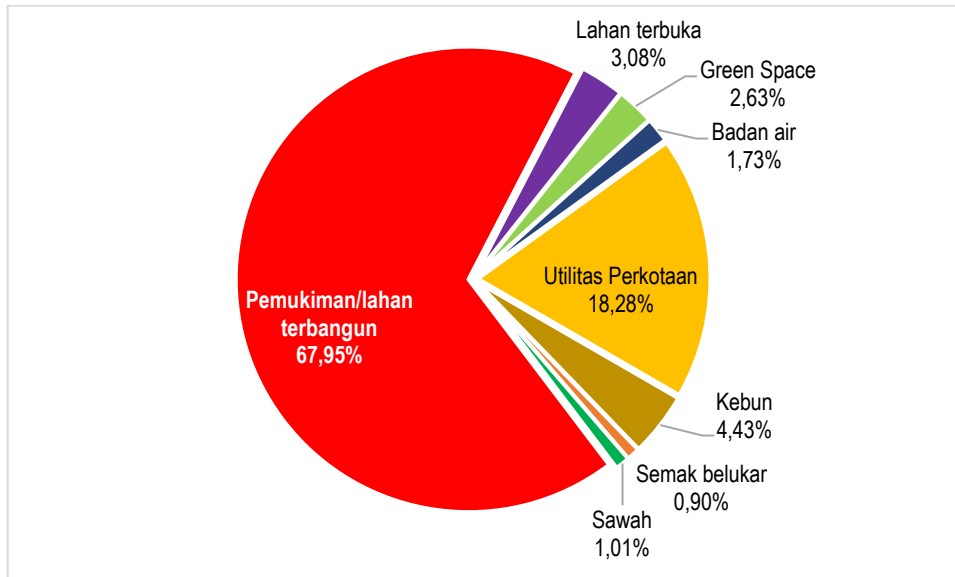
(IPCC, 2006 dalam Kementerian Lingkungan Hidup, 2011).

Emisi atau serapan karbon dari setiap penggunaan lahan diduga dari perubahan biomassa atau tampungan karbon untuk : (1) lahan yang tetap dalam kategori penggunaan lahan yang sama dan (2) lahan yang berubah dari penggunaan awal lahan tersebut ke penggunaan yang lainnya.

Kota Surakarta berkembang menjadi sebuah kota metropolitan modern diiringi oleh alih fungsi lahan, terutama lahan terbuka menjadi lahan untuk kepentingan antropogenik. Beberapa tipe penggunaan lahan yang dominan antara lain adalah pemukiman, perdagangan, jasa dan pariwisata. Secara umum, ditinjau dari komposisi lahan, saat ini Surakarta lebih dominan oleh lahan terbangun dibandingkan dengan lahan terbuka bervegetasi. Berikut adalah data penggunaan lahan Kota Surakarta

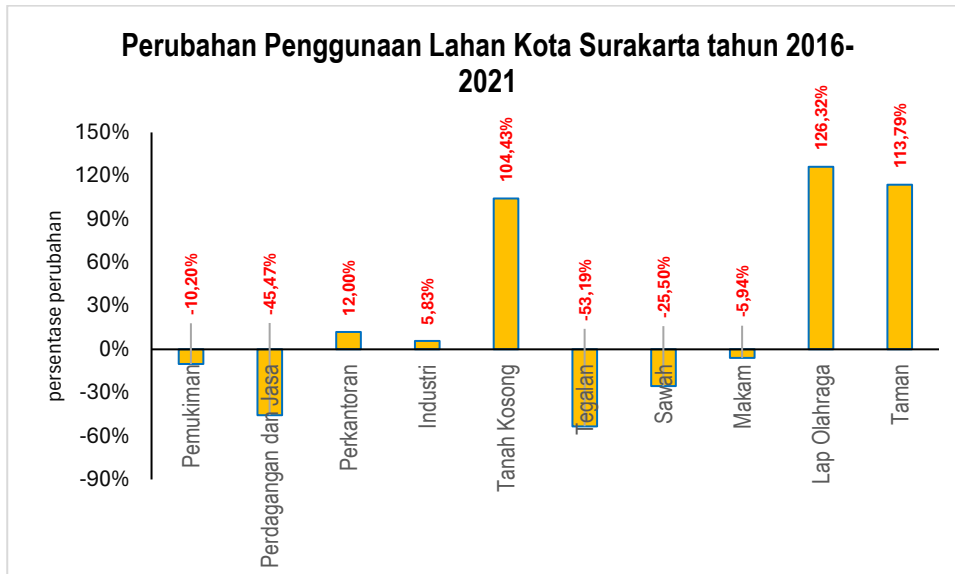


berdasarkan pembagian atau ketersediaan kategori pada pedoman IPCC (2006).



**Gambar 36. Komposisi penggunaan lahan Kota Surakarta tahun 2021 (sumber : Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kota Surakarta, 2023)**

Data PUPR (2023) menunjukkan dominasi lahan terbangun (grey spaces) di penggunaan lahan Kota Surakarta. Persentase lahan terbangun untuk pemukiman, jasa, perkantoran dan industri mencapai 67,95%. Lahan terbangun masih bisa bertambah dari infrastruktur utilitas perkotaan dengan persentase mencapai 18,28%. Penggabungan kedua kelompok lahan terbangun tersebut total dapat mencapai persentase maksimal 86,23%. Harmoni lahan budidaya dengan penyediaan lahan konservasi cukup timpang dan terbatas pada persentase luasan green space 2,63%. Nilai tersebut masih berpotensi bertambah dari ketersediaan lahan kosong di Kota Surakarta yang dapat diubah sebagai alternatif bagi penyediaan keperluan konservasi.



**Gambar 37. Perubahan penggunaan lahan Kota Surakarta pada tahun 2021 terhadap data tahun 2016 (Sumber : Dinas PUPR Kota Surakarta, 2023)**

Spesifikasi penggunaan lahan di Kota Surakarta mengalami fluktuasi ketika membandingkan antara tahun 2016 dan 2021. Pemukiman dan perdagangan jasa mengalami penurunan seperti halnya tegalan, sawah dan makam. Penggunaan lahan tegalan mengalami penurunan paling besar mencapai -63,19% diikuti perdagangan dan jasa (-45,47%) serta persawahan (-25,50%). Penurunan pada lahan budidaya terbuka merupakan konsekuensi dari permintaan lahan antropogenik modern yang besar namun tidak diikuti oleh ketersediaan lahan kosong di Surakarta. Penurunan pada pemukiman didorong oleh kebutuhan konversi untuk lahan dengan penggunaan komersial. Penurunan lahan perdagangan dan jasa kemungkinan terdampak ekonomi pandemi. Peningkatan status lahan terbesar adalah pada lapangan olahraga (126,33%), taman (113,79%) dan tanah kosong (104,43%). Peningkatan lahan taman menjadi hal positif bagi Kota Surakarta karena menunjukkan potensi kenaikan luasan vegetasi.

Perhitungan emisi penggunaan lahan berbasis pada stok karbon yang artinya akan berkorelasi kuat dengan biomassa vegetasi, tidak hanya ketersediaan lahan terbuka atau vegetasi dengan kanopi lebar. Perhitungan

ini sifatnya kontinyu dan saling berkaitan setiap tahunnya. Tahun 2011 dianggap sebagai tahun ke-0 perhitungan sehingga diasumsikan pada 2012 masih terdapat kemampuan serapan karbon natural. Kondisi sesungguhnya baru dapat dianalisis pada hasil perhitungan mulai tahun 2013 hingga 2018.

**Tabel 37. Estimasi serapan karbon dan emisi penggunaan lahan Kota Surakarta**

Tahun hitung	Stok karbon	Serapan/Emisi
	(tonC)	(tonCO <sub>2</sub> eq)
2012	114	-418
2013	-10	37
2014	-8	29
2015	-32	119
2016	-24	88
2017	-10	35
2018	7	-27
<b>2019</b>	<b>-16720</b>	<b>59657</b>

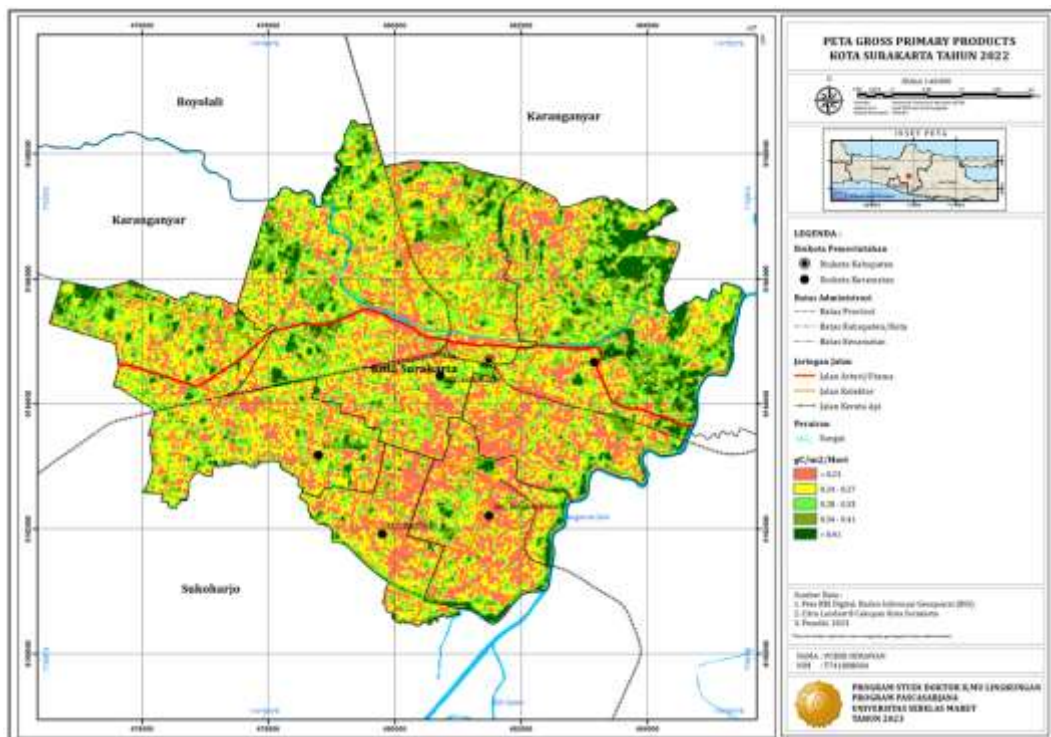
*Sumber : pengolahan data sekunder (2019)*

Perhitungan emisi penggunaan lahan menunjukkan telah terlampauinya daya dukung dan daya tampung alami terhadap emisi karbon. Hal tersebut terlihat pada nilai minus stok karbon yang berarti ada karbon yang tidak mampu terserap oleh lingkungan. Jumlah karbon yang tidak terserap akibat jenuhnya siklus cenderung mengalami peningkatan. Hasil dari kondisi ini adalah munculnya emisi tambahan dari penggunaan lahan yang nilainya mencapai 59657 tonCO<sub>2</sub>eq pada tahun 2019.

Sebuah kewajaran pada wilayah perkotaan terutama dengan luas yang kecil akan mengalami perubahan lahan signifikan dari tahun ke tahun. Hal ini sebagai konsekuensi tingginya kebutuhan lahan, terutama untuk kepentingan antropogenik modern. Kondisi tersebut memberikan konsekuensi negatif bagi lingkungan terutama kemampuan alami untuk turut mereduksi karbon yang dimiliki oleh lahan terbuka bervegetasi. Bagi kota modern berkembang seperti Surakarta, hal tersebut dapat diangkat

menjadi bagian kategori kunci, berkaitan dengan upaya-upaya untuk mereduksi emisi perkotaan.

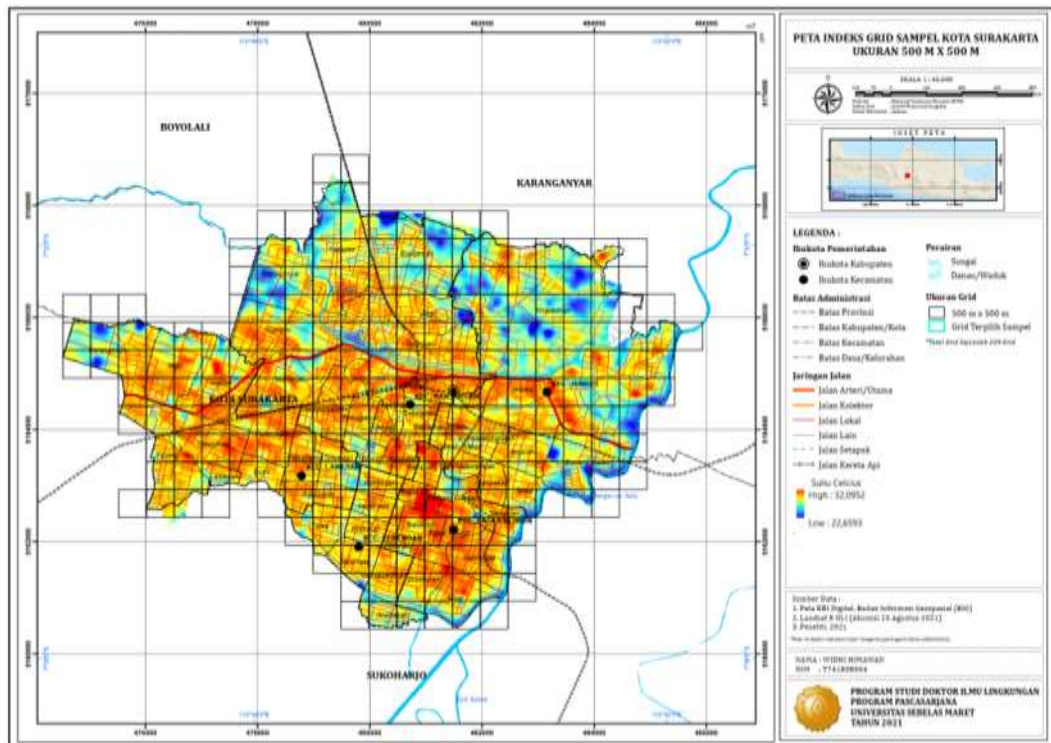
Penelitian Himawan (2023) menunjukkan penurunan luasan vegetasi dengan kerapatan tinggi pada periode 20 tahunan Kota Surakarta. Penurunan tersebut mencapai 16,89%. Kondisi tersebut berdampak pada penurunan stok maupun gross primary product karbon. Stok karbon Kota Surakarta pada tahun 2022 mencapai 1959170,05 kg/tahun. Kemampuan serapan karbon vegetasi Kota Surakarta yang diindikasikan oleh GPP tergolong kecil. Hasil perhitungan menunjukkan nilai GPP Kota Surakarta mencapai 14499,19 gC/hari.



**Gambar 38 Peta gross primary products Kota Surakarta tahun 2022 (sumber : Himawan, 2023)**

Dampak keterbatasan vegetasi adalah penurunan serapan karbon yang mengakibatkan peningkatan suhu pada kawasan pusat kota. Kondisi tersebut disebut sebagai fenomena urban heat island yang telah terjadi di Kota Surakarta (lihat peta). Hanya pada wilayah dengan vegetasi memadai dan ruang terbuka yang tetap mampu mempertahankan kestabilan

temperaturnya. Kondisi ini akan berpengaruh pada psikososial maupun kondisi kesehatan lingkungan perkotaan.

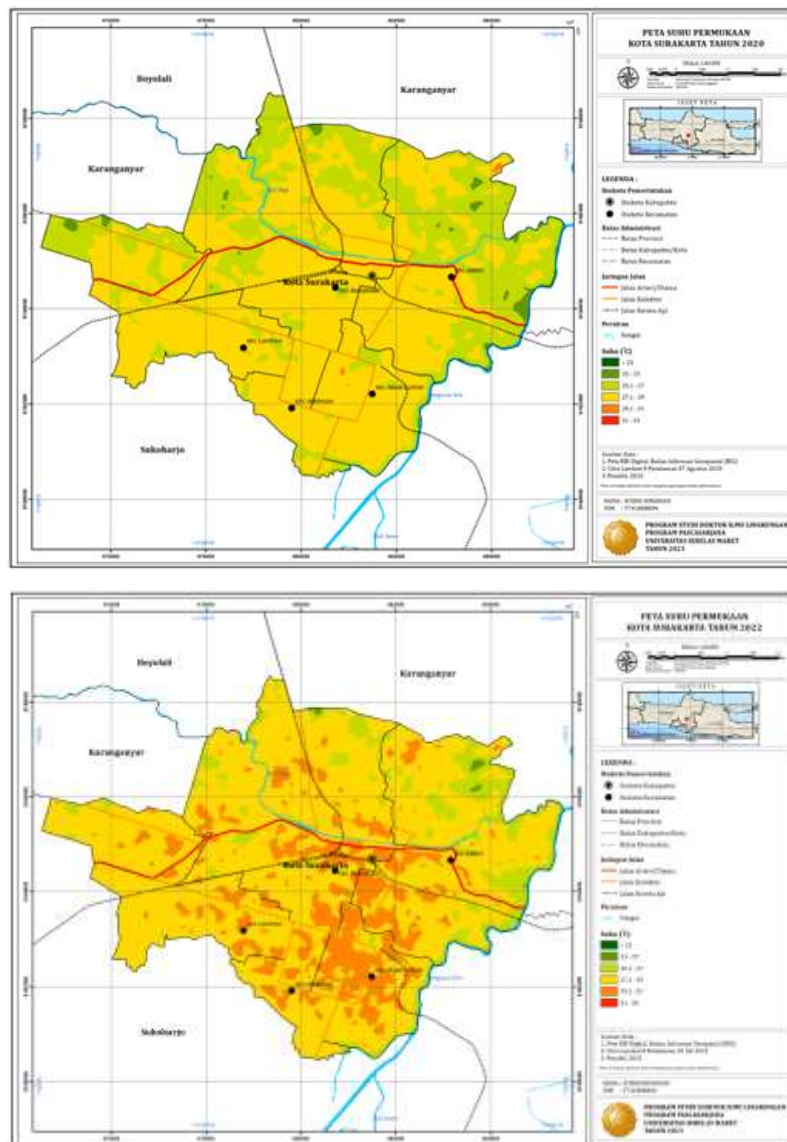


**Gambar 39. Temperatur rata rata Kota Surakarta pada tahun 2021 (Sumber : penginderaan jarak jauh peta Landsat 8 dalam Himawan et al, 2021)**

Kota Surakarta dapat dikatakan telah mengalami krisis ruang terbuka hijau (RTH). Ketersediaan RTH sangat terbatas terutama yang bersifat publik. Kondisi pada RTH privat tidak terlampau membantu upaya perbaikan mengingat kecenderungan kenaikan ekonomi mendorong masyarakat lokal menambah bangunan (IKLH, 2022).

Ketersediaan RTH akan berkaitan erat dengan ruang bagi keanekaragaman hayati urban, termasuk vegetasi, untuk tumbuh dan berkembang. Hal ini bermakna bahwa untuk Kota Surakarta kondisinya sangat terbatas. *Carrying capacity* yang dapat diberikan oleh ketersediaan lahan kemungkinan telah terlampau. Keterbatasan vegetasi akan mempengaruhi pada fungsi ekosistem dan jasa lingkungan yang dapat

diberikan. Padahal, vegetasi masih menjadi opsi utama dalam mitigasi masalah lingkungan perkotaan, termasuk sekuester alami karbon.



**Gambar 40. Perubahan land surface temperature (LST) Kota Surakarta pada tahun 2020 (atas) dan 2022 (bawah) (Sumber : Himawan, 2023)**

Kota Surakarta mengalami kecenderungan peningkatan temperatur pada tahun 2020-2022 (Gambar 39). Pandemi tahun 2020 sebenarnya sempat menurunkan temperatur permukaan karena pembatasan aktivitas. Distribusi nilai LST didominasi oleh warna kuning yang menunjukkan kisaran 27,1-29°C. Nilai LST tertinggi mencapai 29,69 °C dan terendah 23,26 °C. Kondisi tahun 2020 menurun dibandingkan tahun 2019. Nilai LST kembali

meningkat signifikan pada analisis tahun 2022 ketika aktivitas kembali normal pasca pandemi.

Penelitian Himawan (2022) mendapati bahwa untuk seluruh wilayah Kota Surakarta didominasi tutupan kanopi yang sangat rendah hingga rendah (63,2%) sedangkan tutupan kanopi tinggi hanya 17,85%. Hasil penelitian Nancy (2022) menunjukkan bahwa pada kawasan pusat perkotaan Surakarta tutupan kanopi rendah memiliki dominansi lebih tinggi. Tutupan kanopi memiliki korelasi dengan kemampuan vegetasi untuk menyerap karbon maupun mengendalikan iklim mikro dalam hal ini temperatur. Nancy (2022) mendapati nilai korelasi ( $r$ ) antara canopy cover dengan temperatur di bawah naungan hanya  $-0,306$ . Nilai tersebut menunjukkan bahwa vegetasi memiliki determinasi lemah namun signifikan dalam menurunkan temperatur di bawah naungan. Determinasi faktor lain lebih besar dengan kemungkinan dominasi oleh karakter lingkungan perkotaan.

#### **e. Pengelolaan limbah**

Limbah menjadi salah satu obyek utama dalam sebuah penelitian lingkungan. Setiap aktivitas menghasilkan limbah. Hal ini menjadi kandungan dalam Hukum Termodinamika mengenai kekekalan energi dan entropi. Pada dasarnya tidak akan pernah ada aktivitas dengan pelibatan energi yang dapat berlangsung tanpa menimbulkan limbah sebagai produk sisa atau produk sampingannya.

Limbah juga dapat merujuk pada gas emisi, merupakan produk sisa. Namun, limbah dalam kategori ini benar benar murni limbah yang diproduksi dari suatu aktivitas metabolisme atau sisa dari proses produksi atau sisa dari suatu akumulasi kegiatan (misalnya limbah domestik). Limbah disini lebih spesifik, tidak lagi membicarakan produk sisa dari pembakaran atau proses pertanian yang telah terbahas dalam kategori kunci sebelumnya.

Logikanya menjadi sederhana jika makna limbah dalam kategori ini terbatas. Limbah tersebut jumlahnya akan terbatas dan terpengaruh oleh

intensitas atau jumlah pemroduksi limbah tersebut. Kenaikan pada tingkatan aktivitas atau populasi aktivitas yang memproduksi limbah, secara simpel akan meningkatkan jumlah limbah tersebut di lapangan. Beban emisi akan ditentukan oleh faktor kedua yaitu pengelolaan limbah tersebut. Setiap pengelolaan berbeda akan mengembangkan atau menyusutkan nilai asli emisi pada level-level tertentu. Pada paparan tersebut, akan nampak bahwa tidak selamanya suatu pengelolaan yang disebut sebagai proses sehat akan menghasilkan limbah lebih kecil.

Pengolahan limbah di Kota Surakarta menghasilkan GRK melalui tiga aktivitas utama yaitu : landfill methane, pembakaran sampah dan sanitasi. Landfill methane berasal dari open dumping di TPA Putri Cempo yang telah mempersiapkan mitigasi konversi sampah menjadi listrik di masa depan. Sumber pembakaran sampah merupakan sektor penghasil GRK yang tidak muncul sebelumnya dan kini dilaorkan terjadi kembali di Kota Surakarta. Pembakaran sampah masih terjadi dalam jumlah terbatas meskipun Kota Surakarta memiliki regulasi pelarangan kegiatan tersebut.

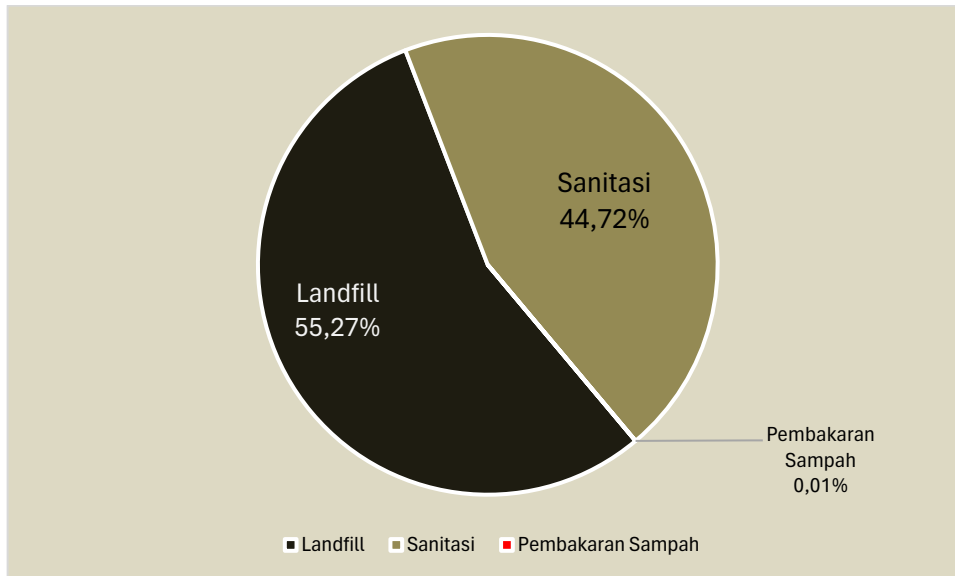
**Tabel 38. Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori pengolahan limbah**

No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq/tahun
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	
1	Landfill	0.00	4565.77	0.00	95881.17
2	Sanitasi	0.00	2863.47	56.26	77573.27
3	Pembakaran Sampah	10.24	0.07	0.00	12.28
<b>TOTAL EMISI</b>		<b>10.24</b>	<b>7429.31</b>	<b>56.26</b>	<b>173466.72</b>

*Sumber : perhitungan data sekunder (2023)*

Emisi yang dihasilkan kategori pengolahan limbah di Kota Surakarta adalah 173466,72 CO<sub>2</sub>eq/tahun. Nilai tersebut terutama dikontribusikan oleh landfill (55,27%) dan sanitasi (44,72%). Nilai GRK kluster pengelolaan limbah meningkat sebesar 9,02% dibandingkan tahun sebelumnya. Kenaikan tersebut sebagai hasil determinasi pertumbuhan populasi penduduk yang berkorelasi langsung dengan produksi sampah dan limbah sanitasi.





**Gambar 41. Kontributor emisi pada kluster pengolahan limbah Kota Surakarta tahun 2023**

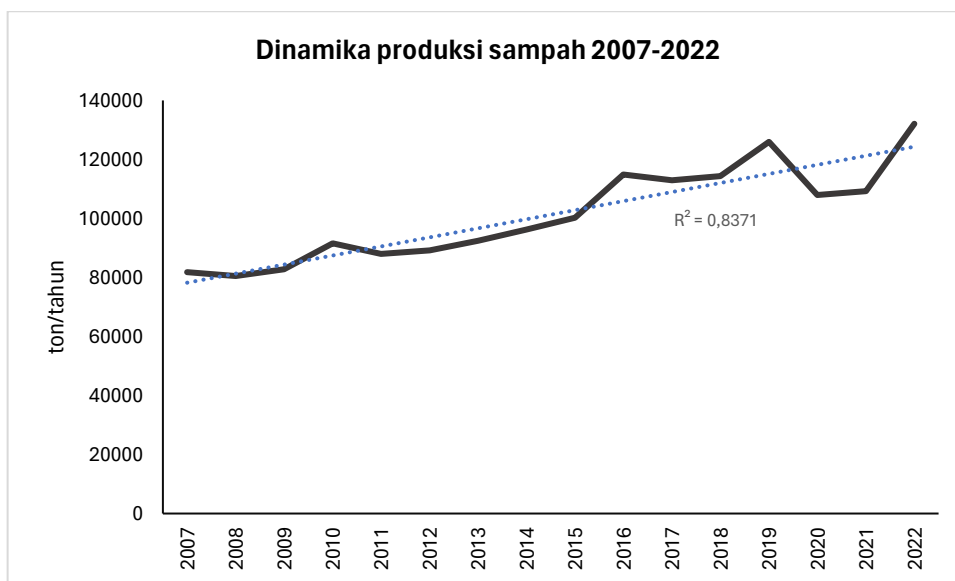
Parameter GRK pada pengolahan limbah didominasi oleh emisi metana dan nitrogen dioksida. Kategori pengolahan limbah masih didominasi oleh emisi metana dari perlakuan atau pengelolaan sampah pada tempat pembuangan akhir. TPA Putri Cempo hingga saat ini dapat dianggap masih mengoptimalkan perlakuan tunggal berupa *open dumping*. Nilai emisi bertambah seiring pertambahan volume sampah tahunan yang diproduksi. Sanitasi juga menjadi kontributor besar namun kondisi ini adalah konsekuensi peningkatan kualitas sanitasi dengan penggunaan septic tank. Septic tank akan menahan limbah lebih lama untuk menghasilkan metana lebih besar.

Poin open dumping merupakan GRK dengan potensi berkurang pada masa mendatang. Hal tersebut didukung oleh operasional PSEL (telah dimulai Oktober 2023) yang melalui proses gasifikasi mengubah sampah menjadi energi listrik. Operasional tersebut paktis mengurangi emisi metana karena tumpukan sampah akan berkurang karena dimanfaatkan dalam PSEL. Penggunaan sampah sebagai "bahan bakar" dalam PSEL akan mengurangi tumpukan secara signifikan karena kebutuhan bahan baku yang besar untuk operasional harian. Operasional PSEL akan menjadi upaya

mitigasi metana open landfill sampah yang efektif sekaligus menjadi implementasi ekoomi sirkuler.

### (1) Sektor: Landfill Sampah

Sampah merupakan salah satu jenis pencemar lingkungan. Apabila tidak bisa ditanggulangi, sampah dapat membawa dampak buruk bagi kesehatan masyarakat seperti terjangkitnya diare, kolera, serta tifus. Selain itu, sampah juga memberi kontribusi terhadap pemanasan global, mengingat sampah dapat menghasilkan gas metan (CH<sub>4</sub>) yang bisa merusak atmosfer bumi.

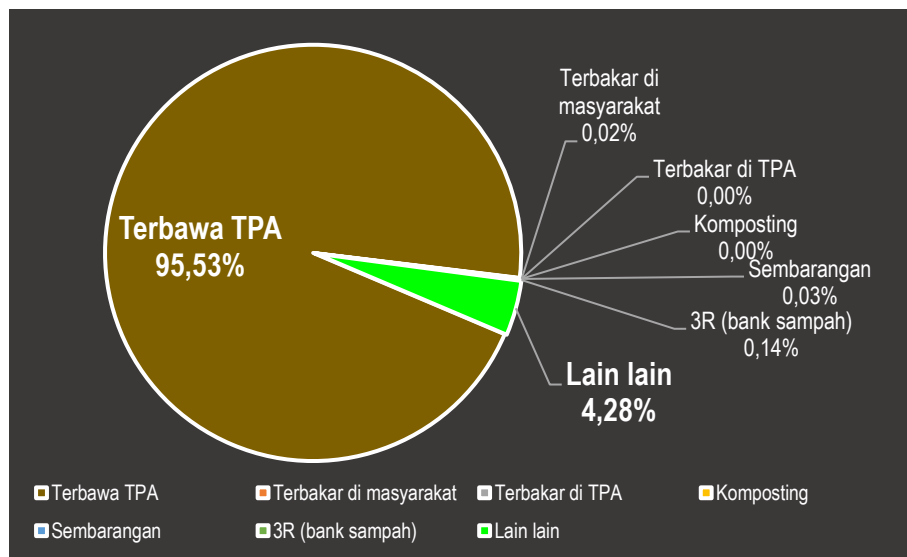


**Gambar 42. Pertumbuhan produksi sampah Kota Surakarta tahun 2007-2022 (sumber : pengolahan data DLH Surakarta, 2023; BPS Kota Surakarta, 2023)**

Pertumbuhan penduduk yang semakin tinggi dan semakin bertambahnya konsumsi masyarakat serta aktivitas lainnya akan berdampak pada terjadinya penambahan volume sampah yang dihasilkan. Grafik di atas (Gambar 37) menunjukkan bahwa percepatan laju jumlah sampah terbuang lebih tinggi dibandingkan populasi penduduk. Hal tersebut mengindikasikan dua hal, pertama adalah ancaman pertumbuhan sampah secara signifikan akibat pertumbuhan populasi dan modernisasi

gaya hidup dan kedua adalah sifat konsumerisme dan etika antropogenik masyarakat yang cenderung enggan mengolah atau mengelola sampah.

Jumlah produksi sampah tahun 2022 menunjukkan rebound effect ketika kondisi pandemi membaik bahkan telah kembali normal. Produksi sampah tahun 2022 mencapai 132096 ton/tahun. Nilai tersebut telah melampaui masa sebelum pandemi. Peningkatan produksi sampah terhadap tahun 2021 mencapai 20,86%. Rasio tersebut menjadi indikator aktivitas antropogenik kembali meningkat namun tidak diimbangi dengan perbaikan persepsi maupun sikap masyarakat dalam mengelola sampah. Masyarakat cenderung bergantung pada kehadiran layanan pemerintah dalam mengelola sampah harian. Hal ini membuat rasio produksi sampah/kapita menjadi lebih tinggi.



**Gambar 43. Data pengelolaan sampah di Kota Surakarta 2022**

Evaluasi tren 2016-2022 menunjukkan kecenderungan meningkat ( $r^2$  : 0,837). Determinasi pertumbuhan populasi bahkan semakin menguat terhadap produksi sampah perkotaan dibandingkan periode inventarisasi sebelumnya. Penurunan pada masa pandemi bersifat temporer dengan potensi terjadinya *rebound effect* cukup tinggi ketika normalitas kegiatan.

Pemulihan layanan angkutan sampah oleh pemerintah pasca pandemi menjadi aspek positif. Total sampah terangkut pada tahun 2022 mencapai 95,53 mengalami peningkatan dibandingkan saat pandemi. Situasi ini ideal

bagi pengendalian sampah masyarakat karena ketercakupannya koordinasi oleh pengelolaan pemerintah. Hal ini akan memberi multiplier effect positif bagi mitigasi dampak lanjutan sampah perkotaan (pembakaran atau pembuangan sembarangan) sekaligus penyediaan bahan baku PSEL secara optimal dan konsisten.

Data dari DLH Surakarta menunjukkan bahwa 95,53% sampah telah terangkut ke TPA Putri Cempo. Sisanya sebagian besar ada pada perlakuan lainlain di luar kendali dari dinas seperti pengelolaan di sekolah adiwiyata dan terjual ke pengepul sampah. Sebagian kecil sampah masih ada yang terbakar di masyarakat atau terbuang sembarangan. Meskipun dalam jumlah terbatas, pembakaran sampah oleh masyarakat memberikan kontribusi pada GRK Kota Surakarta.

Lahan TPA Putri Cempo yang saat ini sudah *overload*. Luas lahan TPA Putri Cempo kurang lebih 17 hektare hanya mampu menampung sampah selama 20 tahun, sedangkan hingga saat ini sudah terhitung hampir 30 tahun. Salah satu permasalahan utama adalah pada pengelolaan sampah di TPA Putri Cempo yang hanya mengandalkan metode *open dumping*.

Pembakaran sampah minim terjadi di Kota Surakarta. Kondisi tersebut didorong oleh adanya regulasi larangan membakar sampah. Hal ini secara otomatis mereduksi emisi pengelolaan limbah dari aktivitas pembakaran sampah. Secara umum, saat ini terdapat beberapa masalah pengelolaan sampah di Surakarta yaitu :

1. Pengelolaan sampah di level hulu (pada masyarakat) masih rendah dan buruk, termasuk upaya pembatasan, pemilahan maupun penggunaan kembali secara mandiri
2. Upaya konvensional dalam pengelolaan sampah seperti 3R dan komposting dipandang kurang menjanjikan secara efektivitas
3. Pengelolaan open dumping pada TPA Putri Cempo mengakibatkan emisi metana dan potensi besar pada kebakaran sampah pada musim musim kemarau

Estimasi emisi landfill sampah diperhitungkan dengan asistensi *worksheet* metana sampah dari IPCC (2006). *Worksheet* tersebut bekerja berdasarkan simulasi timbulan sampah *time series*. Data aktivitas yang dibutuhkan untuk mengoperasikan hitungan adalah data timbulan sampah periodik minimal 5 tahun terakhir dan rataan komposisi sampah. Parameter lain yang mempengaruhi emisi metana telah disesuaikan dengan karakter lokal. Penggunaan simulasi atau pemodelan *time series* menjadikan estimasi GRK landfill sampah dapat dikategorikan sebagai Tier III. Berikut adalah data timbulan sampah Kota Surakarta pada periode 2007 hingga 2022.

**Tabel 39. Timbulan sampah Kota Surakarta periode 2007-2022**

Tahun	Produksi sampah/tahun	Sampah ke TPA	Sampah terbakar
	ton	%	%
2007	81842	100	0
2008	80494	100	0
2009	82741	100	0
2010	91600	100	0
2011	88040	100	0
2012	89161	100	0
2013	92436	100	0
2014	96210	100	0
2015	100267	100	0
2016	114917	100	0
2017	112982	100	0
2018	114369	100	0
2019	125975	100	0
2020	107979	84,94	0,02
2021	109298	95,53	0,02
<b>2022</b>	<b>132096</b>	<b>95,53</b>	<b>0,02</b>

Data aktivitas penunjang lain adalah komposisi sampah masyarakat berdasarkan material yang terbuang. Berikut adalah data komposisi timbulan sampah Kota Surakarta.

**Tabel 40 Komposisi timbulan sampah Kota Surakarta**

No	Komposisi sampah	Persentase (%)
----	------------------	----------------

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



1	Kertas	12,26
2	Kayu	0,00
3	Kain	1,55
4	Karet/kulit	0,50
5	Plastik	13,39
6	Metal/logam	1,80
7	Gelas/kaca	1,72
8	Organik	61,95
9	Lainnya	6,83

Sumber : BPS Surakarta (2019)

Berdasarkan komposisi, sampah di Kota Surakarta didominasi oleh tiga material yaitu organik (61,95%), plastik (13,39%) dan kertas (12,26%). Dominasi jenis sampah organik menunjukkan potensi dan kerentanan emisi metana. Berikut adalah hasil estimasi emisi landfill sampah di Kota Surakarta dengan menggunakan model IPCC.

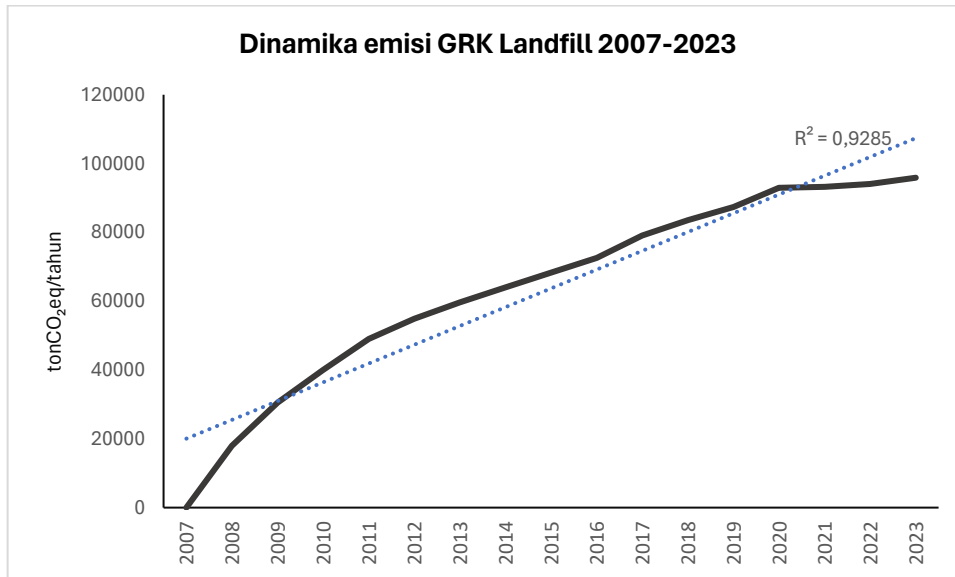
**Tabel 41 Estimasi emisi metana landfill sampah di Kota Surakarta tahun 2023**

No	Sektor aktivitas	Tumpukan sampah (ton)	Emisi (tonCH <sub>4</sub> /tahun)	CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
1	Landfill sampah	132029	4565,77	95881,17
<b>TOTAL EMISI</b>			<b>4565,77</b>	<b>95881,17</b>

Sumber : perhitungan data sekunder (2023)

Emisi yang dihasilkan dari landfill TPA Putri Cempo adalah **95881,17** tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Kecenderungan GRK sampah menunjukkan peningkatan selama periode 2008-2023 ( $r^2 : 0,929$ ). Determinasi GRK landfill sampah mengalami penurunan dibandingkan tahun 2022. Hal tersebut didorong oleh penurunan jumlah masukan sampah di TPA Putri Cempo akibat pandemi. Penurunan didorong oleh faktor layanan pengangkutan sampah yang sempat menurun saat pandemi. Nilai GRL landfill TPA Putri Cempo berpotensi menurun seiring dengan operasional PSEL yang akan mengubah sebagian besar sampah menjadi energi listrik. Salah satu yang wajib jadi perhatian adalah masih terjadinya pembakaran sampah pada masyarakat.

Belum seluruh sampah mampu terangkut ke TPA sehingga akan mengancam keefektifitas dari rencana PSEL.



**Gambar 44. Dinamika GRK Landfill Putri Cempo Kota Surakarta tahun 2007-2023**

## (2) Sektor: Pembakaran sampah

Pembakaran sampah sebenarnya terjadi dalam jumlah sangat minim di Kota Surakarta. Kondisi tersebut terbantu oleh rasio pengangkutan dan pengolahan model lain yang cukup tinggi, termasuk pada beragam pendekatan pengolahan sejak hulu. Keberadaan regulasi yang melarang pembakaran juga membatasi tindakan tersebut. Namun, meskipun dalam jumlah kecil, kegiatan pembakaran sampah menyebabkan peningkatan pada GRK terutama CO<sub>2</sub> dan memberikan resiko bagi kesehatan lingkungan.

Beban emisi dari pembakaran sampah menghasilkan emisi variabel CO<sub>2</sub> (paling dominan), CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O. Perhitungan beban emisi tersebut dengan menggunakan faktor emisi IPCC (2006) dan mempertimbangkan faktor oksidasi pada masing masing variabel tersebut. Berikut adalah detail dari faktor oksidasi dan faktor emisi yang digunakan.

**Tabel 42. Faktor oksidasi dan faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan beban emisi pembakaran sampah**

Variabel Emisi	Faktor oksidasi	Faktor emisi (kg/ton C fosil, kecuali untuk CO <sub>2</sub> satuan ton/ton C fosil)
Karbondioksida (CO <sub>2</sub> )	0,58	3,67
Metana (CH <sub>4</sub> )	0,58	6,5
Dinitrogen oksida (N <sub>2</sub> O)	0,58	0,15

Sumber : IPCC (2006)

Jenis sampah akan menentukan pula nilai emisi karena terdapat perbedaan pada rasio bahan kering, rasio C pada bahan kering dan rasio kandungan C fosil. Pada ketiga kategori tersebut, salah satu bahan yang beresiko menimbulkan emisi tertinggi saat terbakar adalah plastik.

**Tabel 43. Profil C pada material sampah terbakar**

Jenis Sampah Padat	Berat sampah	Kandungan bahan kering (%)	%C bahan kering	%C fosil pada total C
Kertas	3	90	46	1
Tekstil	0,5	80	50	20
Sisa Makanan	15,5	40	38	0
Karet dan Kulit	0,25	84	67	20
Plastik	3,25	100	75	100
Lainnya	2,5	90	3	100

Sumber : IPCC (2006)

Mengkombinasikan data aktivitas, faktor oksidasi dan faktor emisi tersebut, maka dapat diperhitungkan beban emisi pembakaran sampah di Kota Surakarta pada tahun 2023 sebagai berikut.

**Tabel 44. Beban emisi aktivitas pembakaran sampah Kota Surakarta**

No	Jenis/kategori sampah	Beban emisi (ton/tahun)			CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	



**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



1	Kertas	0.05	0.02	0.00	0.55
2	Tekstil	0.31	0.01	0.00	0.47
3	Sisa makanan	0.00	0.02	0.00	0.43
4	Karet&kulit	0.00	0.00	0.00	0.00
5	Plastik	9.70	0.02	0.00	10.35
6	Lainnya	0.18	0.01	0.00	0.49
<b>TOTAL EMISI</b>		<b>10.24</b>	<b>0.07</b>	<b>0.00</b>	<b>12.28</b>

*Sumber : perhitungan data sekunder (2023)*

Total beban emisi dari aktivitas pembakaran sampah di Kota Surakarta untuk variabel CO<sub>2</sub> sebesar 10,24 ton/tahun. Untuk variabel CH<sub>4</sub> sebesar 0,07 ton/tahun dan untuk variabel N<sub>2</sub>O sebesar 0,00 ton/tahun. Nilai GRK tersebut setara dengan 12,28 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun. Ditinjau dari komposisi sampah terbakar, jumlah beban emisi tidak selalu berkorelasi positif dengan berat sampah terbakar. Faktor yang lebih berpengaruh adalah jenis dan karakter bahan terbakar, terutama pada kadungan kering material dan kadar C dalam materi tersebut. Semakin tinggi kedua faktor tersebut, akan semakin besar emisinya. Dari keseluruhan jenis yang terbakar, nilai tertinggi untuk dry material content dan kadar C adalah pada jenis plastik. Sehingga, beban emisi yang dihasilkan dari pembakaran bahan plastik jauh lebih tinggi dari bahan lainnya, bahkan ketika beratnya lebih rendah.

### **(3) Sektor: Sanitasi Domestik**

Pola sanitasi masyarakat tidak hanya berpengaruh pada kondisi kesehatan lingkungan, namun juga menentukan beban emisi yang ditanggung oleh suatu wilayah akibat aktivitas ini. Beban emisi yang dihasilkan oleh aktivitas sanitasi hanyalah variabel CH<sub>4</sub> atau metana. Karakter aktivitas ini sama dengan emisi pada aktivitas enterik peternakan. Data aktivitas utama dalam perhitungan emisi ini adalah populasi Kota Surakarta. Data tersebut dilengkapi dengan fraksi kawasan di Boyolali dan model sanitasi masyarakat untuk menyesuaikan faktor emisi yang digunakan.

Model sanitasi masyarakat secara umum akan terbagi dalam 4 kategori utama yaitu septik tank, cubluk, sewer dan sembarangan. Sistem sanitasi yang sehat dan modern umumnya adalah septic tank. Cubluk dan sewer disebut sebagai sistem sanitasi sederhana. Sedangkan sistem sanitasi yang dibuang sembarangan sama artinya dengan belum memiliki sistem sanitasi. Berikut adalah sekilas deskripsi pada masing masing sistem sanitasi tersebut :

1. *Septic tank*, merupakan sistem sanitasi dengan perlakuan pada limbah domestik yang dihasilkan. Pada sistem ini, separuh dari BOD yang dihasilkan akan tertinggal pada tangki perlakuan. Nilai methane correction factor (MCF) 0,5 (IPCC, 2006 Chapter 6 *Wastewater*). Secara kesehatan sistem ini dianggap sebagai sistem yang paling sehat, terutama jika pembangunan memenuhi persyaratan persyaratan yang ditentukan.
2. Cubluk, tangki pemuatan limbah pada cubluk atau latrine dibuat lebih sederhana dibandingkan *septic tank*. Kapasitasnya biasanya lebih kecil dan lebih layak untuk lokasi yang relatif kering. Biasanya untuk rumah tangga dengan jumlah anggota 3-5 orang. Nilai MCF nya 0,1 (IPCC, 2006). Namun, karena daya muat yang kecil, model ini akan lebih sering dan konsisten dikosongkan, BOD yang tertinggal relatif lebih kecil dibandingkan septic tank
3. Sewer adalah sistem sanitasi yang terbuka dan langsung terpapar sehingga suhunya relatif hangat. Beberapa tipe sewer langsung mengalirkan kotoran melalui saluran atau selokan selokan khusus. Karena terbuka dan terpapar panas, maka emisi CH<sub>4</sub> dari sistem ini adalah yang paling besar. Sewer adalah sistem sanitasi paling tradisional. Nilai MCFnya mencapai 0,6 (IPCC, 2006).
4. Sembarangan. Sanitasi ini tidak bisa disebut sebagai sebuah sistem karena limbah akan langsung dibuang ke alam tanpa menggunakan perangkat atau saluran khusus. Sehingga lebih tepat disebut sebagai sistem sanitasi tanpa perlakuan. Karena tanpa perlakuan dan

biasanya pada air permukaan mengalir (contoh : sungai), maka nilai MCF akan menjadi relatif tinggi sebab limbah akan mengalir bersama aliran alami tersebut. Nilai MCF model ini adalah 0,6 (IPCC, 2006). Meski memiliki nilai emisi paling kecil, sistem ini sangat buruk ditinjau dari aspek kesehatan lingkungan.

Emisi dari sektor sanitasi domestik akan memperhitungkan emisi metana (CH<sub>4</sub>) langsung dan emisi nitrogen dioksida (N<sub>2</sub>O) tidak langsung. Perhitungan mengaplikasikan pendekatan Tier II dengan memanfaatkan ketersediaan data aktivitas lokal terkait sarana sanitasi serta mengaplikasikan faktor emisi yang dikonversi dari kondisi lokal. Berikut ini adalah detail data aktivitas analisis estimasi emisi untuk Kota Surakarta sesuai dengan data sekunder instansi terkait.

**Tabel 45 Data aktivitas sektor sanitasi domestik Kota Surakarta**

Kecamatan	Populasi	Fraksi populasi			Fraksi pengolahan limbah domestik			
		Pede- saan	Kota (pen- dapat an tinggi)	Kota (penda- patan rendah)	ST	CK	SR	BABS
Laweyan	88617	0	91.16	8.84	100	0	0	0
Serengan	47921	0	91.16	8.84	100	0	0	0
Pasar Kliwon	78600	0	91.16	8.84	100	0	0	0
Jebres	138921	0	91.16	8.84	100	0	0	0
Banjarsari	168949	0	91.16	8.84	100	0	0	0

*Sumber : Dinas Kesehatan Surakarta (2023)*

*Keterangan : Populasi pada tahun 2023, fraksi dalam persen, ST adalah septic tank, CK adalah cubluk, SR adalah sewer dan BABS adalah buang air besar sembarangan*

Kota Surakarta diketahui telah mencapai 100% open defecation free (ODF), 100% kepemilikan septic tank. Mayoritas telah dimiliki pribadi, sebagian akses bersama. Angka buang air besar sembarangan untuk semua kecamatan nilainya 0 mengindikasikan hampir tidak ada lagi BABS di

Surakarta. Fraksi populasi menunjukkan dominasi kawasan perkotaan yang mayoritas masyarakat berpendapatan tinggi (91,16%).

Pada perhitungan beban emisi sanitasi domestik selain digunakan faktor emisi, digunakan pula faktor konversi untuk menentukan massa limbah yang dihasilkan setiap individu. Berat limbah tersebut berwujud kg BOD/orang/hari, yang akan menjadi basis perhitungan emisi sanitasi domestik. Koefisien nasional untuk BOD setiap individu adalah sebesar 0,04 kg/orang/hari. Berikut adalah paparan kedua faktor tersebut

**Tabel 46. Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi CH<sub>4</sub> (metana) sanitasi domestik**

Jenis koefisien Perhitungan	Nilai	Satuan
<b>Faktor konversi</b>		
BOD/orang	0,04	Kg/orang/hari
Ambang batas limbah industri	1,25	
Total organic waste (TOW)	17651673,75	Kg BOD/tahun
<b>Faktor koreksi metana</b>		
Septic tank	0,5	
Cubluk	0,1	
Sewer	0,6	
Sembarangan	0,6	
<b>Faktor emisi</b>		
Septic tank	0,3	Kg CH <sub>4</sub> /kg BOD
Cubluk	0,06	Kg CH <sub>4</sub> /kg BOD
Sewer	0,48	Kg CH <sub>4</sub> /kg BOD
Sembarangan	0,06	Kg CH <sub>4</sub> /kg BOD

*Sumber : faktor konversi berdasarkan perhitungan primer, faktor koreksi metana dan faktor emisi dari Kementerian Lingkungan Hidup (2011).*

Selain menghasilkan emisi variabel CH<sub>4</sub>, sanitasi domestik juga menghasilkan emisi N<sub>2</sub>O (dinitrogen oksida). Basis perhitungan emisi N<sub>2</sub>O berbeda dengan CH<sub>4</sub> karena menggunakan dasar konsumsi protein perkapita untuk dikalikan dengan jumlah populasi. Berdasarkan standar nasional Indonesia, konsumsi protein perkapita bernilai 62,23

kg/orang/tahun (BPS Nasional, 2022). Berikut ini adalah faktor konversi dan faktor emisi yang digunakan.

**Tabel 47. Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi N<sub>2</sub>O (nitrogen oksida) sanitasi domestik**

Jenis koefisien perhitungan	Nilai	Satuan
Konsumsi protein per kapita <sup>1</sup>	62,23	Kg/orang/tahun
Faktor protein tidak dikonsumsi masuk dalam limbah	1,1	
Faktor protein <i>co discharged</i> limbah industri&komersial	1,25	
Fraksi nitrogen dalam protein	0,16	
Faktor emisi	0,005	Kg N <sub>2</sub> O-N/kg N

Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup (2011), <sup>1</sup>BPS Nasional (2022)

Menggunakan ketersediaan data aktivitas, faktor konversi dan faktor emisi dapat diperhitungkan estimasi emisi sanitasi domestik pada parameter metana (CH<sub>4</sub>) maupun nitrogen dioksida (N<sub>2</sub>O) dengan hasil sebagai berikut

**Tabel 48. Estimasi emisi sektor sanitasi domestik Kota Surakarta tahun 2023**

No	Kecamatan	Populasi	Emisi CH <sub>4</sub> langsung (ton/tahun)	Emisi N <sub>2</sub> O tidak langsung (ton/tahun)	CO <sub>2</sub> eq (ton/tahun)
1	Laweyan	88617	485.18	9.53	13143.80
2	Serengan	47921	262.37	5.15	7107.71
3	Pasar Kliwon	78600	430.34	8.45	11658.06
4	Jebres	138921	760.59	14.94	20604.96
5	Banjarsari	168949	925.00	18.17	25058.75
<b>TOTAL EMISI</b>			<b>2863.47</b>	<b>56.26</b>	<b>77573.27</b>

Sumber : perhitungan data sekunder (2023)

Total GRK sanitasi domestik pada tahun 2023 mencapai 77573,27 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun yang hanya berasal dari parameter CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O. Nilai tersebut akan bertambah seiring dengan pertambahan populasi dan fasilitas septic tank perkotaan.

Nilai emisi sanitasi domestik berkorelasi negatif dengan kelayakan kesehatan sarana sanitasi. Sarana sanitasi modern seperti septic tank ternyata menyumbang emisi metana maupun nitrogen dioksida lebih besar daripada buang air besar sembarangan karena lebih lama menahan kotoran (feses) pada suatu lokasi yang statis.

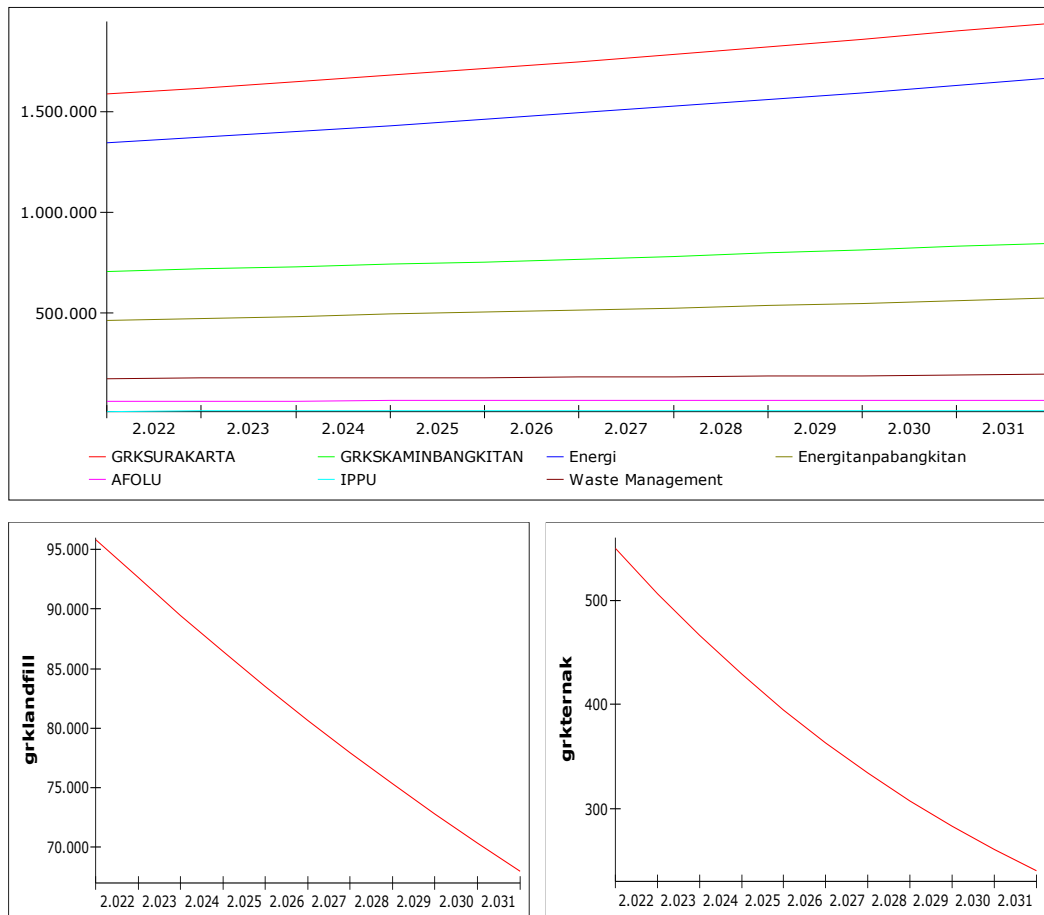
Berdasarkan fakta tersebut artinya adalah pada era perbaikan kualitas kesehatan sanitasi, peningkatan emisi GRK tidak dapat dihindari dan cenderung akan dipengaruhi faktor tunggal berupa populasi. Emisi tersebut tidak dapat ditekan hanya dapat dimanfaatkan kembali dengan pengambilan unsur metana sebagai bahan bakar alternatif. Kota Surakarta telah memiliki fasilitas IPLT yang mengambil lumpur tinja untuk bahan baku biogas, begitupula dengan beberapa fasilitas pada komunitas masyarakat. Sayangnya, belum ada data tentang jumlah lumpur yang diambil dan dimanfaatkan sebagai biogas.

## **B. Proyeksi Gas Rumah Kaca Kota Surakarta**

Proyeksi Gas Ruma Kaca (GRK) penting sebagai upaya menempatkan target capaian berbasis pada kondisi terdahulu (time series). Proyeksi dilakukan dengan pendekatan sistem dinamis untuk periode 2022-2032. Proyeksi diterapkan pada setiap kluster GRK IPCC. Detail input data dilakukan untuk sub sektor dengan dokumentas time series yang lengkap. Sub sektor tanpa dokumentasi time series lengkap akan didekati menggunakan rata-rata perubahan selama periode inventarisasi yang telah dilakukan.

Secara umum keseluruhan kluster GRK akan mengalami kenaikan pada proyeksi 2022-2032. Perbedaan kondisi setiap kluster adalah rasio kenaikan. Hal tersebut disebabkan oleh keberadaan beberapa sub sektor yang mengalami penurunan karena dilakukan mitigasi atau intensitas kegiatan yang memang berkurang. Contoh kondisi tersebut adalah pada GRK landfill sampah di TPA Putri Cempo karena operasional PSEL yang menggunakan mayoritas sampah sebagai bahan baku produksi listrik.

Kondisi serupa terjadi pada proyeksi GRK peternakan yang disorong faktor jumlah ternak semakin menurun dengan sebagian besar hanya transit. Permasalahan ketersediaan lahan menjadi penyebab utama penurunan jumlah ternak tersebut.



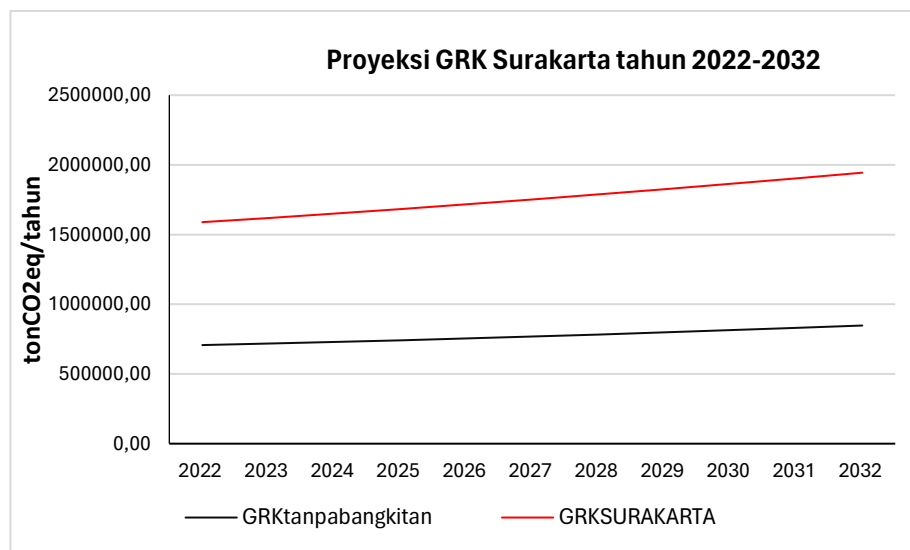
**Gambar 45. Hasil proyeksi GRK Kota Surakarta 2022-2032 bersama dinamika setiap sub sektor. Grafik bagian bawah menunjukkan proyeksi penurunan pada sub sektor landfill sampah dan peternakan**

Proyeksi jangka menengah menunjukkan kecenderungan kenaikan GRK Surakarta. Kenaikan tersebut lebih tinggi ketika mengikutsertakan emisi bangkitan listrik karena dampak penurunan pada beberapa sub sektor menjadi kurang signifikan. GRK dari kluster penggunaan energi akan konsisten menjadi kontributor utama sekaligus kategori kunci Kota Surakarta. Hal ini berarti upaya mitigasi yang efektif dapat dilakukan

dengan menyentuh langsung pada sumber pengguna energi utama yaitu transportasi.

**Tabel 49. Proyeksi nilai tahunan GRK Kota Surakarta periode 2022-2032**

No	Tahun	Nilai GRK tanpa emisi bangkitan (tonCO <sub>2</sub> eq/tahun)	Nilai GRK dengan emisi bangkitan (tonCO <sub>2</sub> eq/tahun)
1	2022	707250.10	1589203.07
2	2023	718108.12	1619464.06
3	2024	729627.09	1650812.85
4	2025	741822.58	1683274.43
5	2026	754711.17	1716874.97
6	2027	768310.46	1751641.86
7	2028	782639.06	1787603.75
8	2029	797716.68	1824790.59
9	2030	813564.10	1863233.64
10	2031	830203.28	1902965.55
11	2032	847657.31	1944020.35



**Gambar 46. Proyeksi GRK Kota Surakarta tahun 2022-2032 skenario dengan dan tanpa emisi bangkitan**



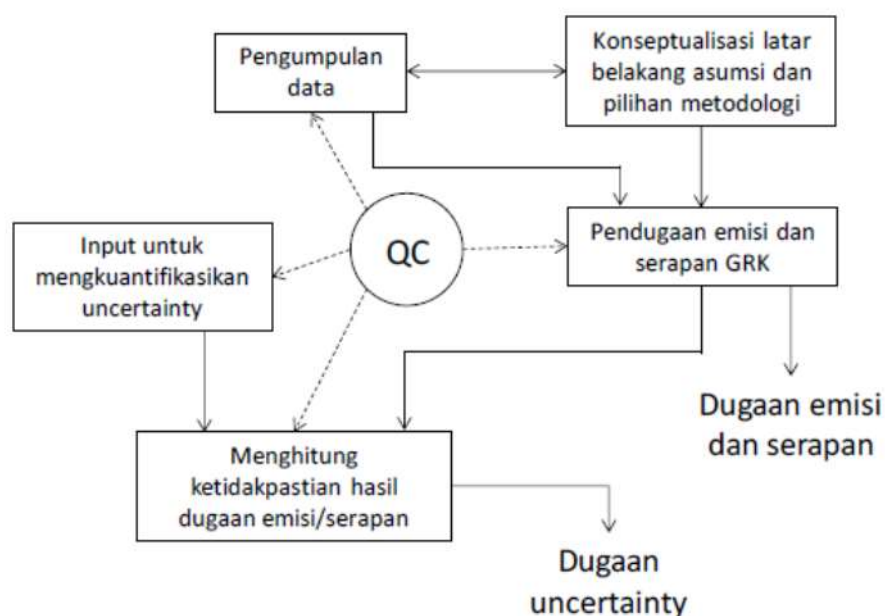
## BAB IV ANALISIS KETIDAKPASIAN DAN KATEGORI KUNCI

### A. Analisis Ketidakpastian

Ketidakpastian atau *uncertainty* adalah kurangnya pengetahuan tentang nilai sebenarnya (*true value*) dari suatu peubah yang bisa dideskripsikan dalam bentuk sebaran kepekatan peluang yaitu mencirikan besar selang kemungkinan nilai dari peubah tersebut. Uncertainty tergantung pada tingkat pengetahuan analisis dan akhirnya akan berujung pada kualitas dan besaran dari nilai serta pengetahuan terkait dari proses dan metode dalam pengukuran dan pengumpulan data.

Analisis ketidakpastian merupakan analisis untuk menilai sebesar apa kesalahan hasil dugaan emisi/serapan. Kemunculan analisis ketidakpastian dimulai dari konseptualisasi asumsi, pemilihan model dan input data serta asumsi-asumsinya. Asumsi dan metode yang dipilih akan menentukan banyak dan jenis kebutuhan data yang diperlukan. Secara umum, sumber penyebab atau penyumbang terhadap besarnya tingkat ketidakpastian adalah : kelengkapan data, model pendugaan emisi, ketersediaan data, kesalahan acak, kesalahan pengukuran, kesalahan pelaporan dan kehilangan data.

Pengumpulan data sekunder sederhana namun tidak mudah. Data tersebut terkadang tidak tersedia ataupun tersedia namun belum dalam format yang sesuai. Kelengkapan data dikumpulkan dalam periode pengumpulan data. Data yang belum terlengkapi akan dicoba untuk dilengkapi pada Stakeholder Meeting II dengan mengkonsultasikan langsung pada forum instansi terkait (pemilik data).



**Gambar 47. Struktur generik analisis ketidakpastian (IPCC, 2006)**

*Uncertainties* atau metode ketidakpastian diatasi dengan pendekatan interpolasi. Kondisi ini diaplikasikan untuk data-data tertentu, umumnya pada sumber yang kuantitasnya satuan aktivitasnya besar. Pada sumber emisi tersebut survey total sulit dilakukan karena keterbatasan waktu. Solusinya adalah dilakukan sampel terhadap beberapa sumber dan hasil perhitungan sampel akan digunakan untuk keseluruhan populasi dengan melibatkan interpolasi dengan faktor tertentu.

Analisis ketidakpastian dalam inventarisasi GRK Kota Surakarta relatif tidak banyak dilakukan karena data-data telah tersedia pada dokumen sekunder resmi. Adapun kegiatan ini membatasi dari pelaksanaan survey primer dan lebih berpegang pada pendekatan koleksi data *top down approach*.

Dokumen inventarisasi GRK Kota Surakarta ini secara keseluruhan belum dapat menilai tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) karena ketiadaan data dasar (*baseline data*) emisi GRK (IPCC, 2006). Dokumen ini dapat dikatakan sebagai landasan atau pembuka inventarisasi GRK yang diinisiasi langsung oleh pemerintah kota sehingga dokumen ini akan berperan sebagai data dasar bagi inventarisasi berikut. Inventarisasi berikut adalah

momentum ideal untuk memulai perhitungan ketidakpastian secara menyeluruh.

Ketidakpastian akan berkaitan dengan penggunaan data aktivitas, faktor konversi dan faktor emisi. Semakin kompleks suatu data aktivitas, maka nilai ketidakpastian dianggap akan semakin rendah. Faktor konversi dan faktor emisi yang bersifat lokal akan lebih mampu menggambarkan kondisi emisi lokal dan faktor yang mempengaruhinya. Oleh sebab itu, kedua konstanta tersebut akan memiliki ketidakpastian rendah apabila menampilkan nilai lokal.

Ketidakpastian yang terjadi pada penyusunan inventarisasi emisi ini adalah temuan pada inkonsistensi merujuk pada dokumen sebelumnya. Inkonsistensi dapat berupa sumber emisi (dari jenis bahan bakar) maupun angka data aktivitas yang berkait dengan dokumen sebelumnya. Hasil analisis sementara menunjukkan kondisi tersebut disebabkan oleh perbedaan visi dan pemahaman atas kebutuhan data aktivitas untuk perhitungan gas rumah kaca (GRK).

Kajian inventarisasi GRK tahun 2023 ini telah melaksanakan beberapa inovasi untuk menekan rasio ketidakpastian. Salah satu yang krusial adalah menambahkan analisis pendekatan bottom up untuk GRK transportasi jalan raya. Urgensi penambahan ini karena transportasi jalan raya merupakan key category GRK Kota Surakarta. Analisis bottom up masih dibatasi pada jalur gerbang Kota Surakarta. Jalur tersebut tersusun atas jalan jalan utama yang menyambung langsung dengan pusat kota.

Analisis ini signifikan mengurangi level ketidakpastian data terutama akibat interaksi variabel data aktivitas *sales product* bahan bakar dan karakter Surakarta. Sales product bahan bakar membatasi estimasi GRK pada nilai penjualan di unit unit SPBU Kota Surakarta. Padahal, beban transportasi kota banyak berasal dari aktivitas komuter maupun transport. Pendekatan *bottom up* akan mengurangi simpangan analisis hasil tersebut.

## B. Kategori Kunci

Kategori kunci merupakan sumber/rosot yang menjadi prioritas dalam sistem inventarisasi GRK karena memiliki besar emisi/serapan berpengaruh signifikan terhadap keseluruhan inventarisasi baik dari nilai mutlak, tren, dan tingkat ketidakpastian. Kementerian Lingkungan Hidup (2011) mensitasi IPCC (2006) membagi kategori utama dalam inventarisasi GRK menjadi 4 kategori yaitu : penggunaan energi (*energy*), proses industri dan penggunaan produk (IPPU), pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan (AFOLU) dan pengelolaan limbah (*waste*). Keempat kategori tersebut akan memunculkan intensitas berbeda terhadap keseluruhan emisi maupun pada sektor-sektor di dalamnya tergantung pada karakteristik wilayah perkotaan. Beberapa faktor *trigger* yang dapat menentukan kategori kunci pada suatu wilayah antara lain :

1. Sosial budaya masyarakat setempat termasuk persepsi lingkungan, etika lingkungan dominan dan gaya hidup
2. Mata pencaharian atau sektor perekonomian utama yang berkembang dan dikembangkan pada lingkungan setempat
3. Penggunaan lahan utama dan profil geografis wilayah perkotaan

Secara umum terdapat dua metode dalam analisis kategori kunci. Pendekatan pertama menganalisis kategori kunci berdasarkan nilai batas emisi kumulatif. Pendekatan kedua adalah dengan memanfaatkan ketersediaan analisis ketidakpastian atau uncertainty. Pendekatan kedua tidak dapat dilakukan dalam inventarisasi GRK Surakarta karena tidak tersedianya analisis ketidakpastian, sehingga pendekatan yang akan digunakan dalam penentuan kategori kunci adalah metode pertama, Metode pertama terbagi dua yaitu untuk data inventarisasi dalam batasan temporal satu tahun menggunakan Level Assesment dan untuk data inventarisasi yang tersedia dalam time series menggunakan Trend Assesment. Inventarisasi emisi GRK Kota Surakarta hanya menyediakan data dalam satu tahun perhitungan sehingga digunakan pendekatan Level Assesment dengan mengaplikasikan formula sebagai berikut.

$$L_{x,t} = |E_{x,t}| / \sum |E_{x,t}| \dots(4.1)$$

Dengan

$L_{x,t}$  adalah rasio determinasi sektor emisi x terhadap total emisi t

$E_{x,t}$  adalah besaran emisi sektor x dalam keseluruhan emisi t

Kategori kunci merupakan kategori utama atau kelompok sektoral yang memiliki beban emisi mencapai 95% dari keseluruhan atau total emisi suatu wilayah atau suatu kategori utama IPCC.

Kajian kategori kunci emisi GRK Kota Surakarta secara keseluruhan, berbasis kategori utama IPCC dengan mengaplikasikan rumus (4.1) mengindikasikan hal sebagai berikut :

1. Untuk parameter GRK karbondioksida, kategori kunci Kota Surakarta adalah penggunaan energi dengan nilai  $L_{x,t}$  mencapai 87,12% dari keseluruhan emisi
2. Untuk parameter GRK metana, kategori kunci Kota Surakarta adalah pengelolaan limbah dengan nilai  $L_{x,t}$  mencapai 97,95%
3. Untuk parameter GRK nitrogen dioksida, kategori kunci Kota Surakarta adalah pengelolaan limbah (47,23%) dan penggunaan energi (47,12%)

Tinjauan dari besaran dan resiko emisi pada setiap parameter, maka kategori kunci emisi GRK di Kota Surakarta adalah penggunaan energi. Hal tersebut ditentukan hanya dari satu parameter GRK utama yaitu karbondioksida. Alasan hal tersebut karena status karbondioksida sebagai gas rumah kaca dengan resiko nomor satu pada lingkungan berikut potensi keluarannya yang memiliki intensitas tinggi, kontinyu, konsisten dan cenderung terus mengalami peningkatan seiring kondisi lingkungan alami, termasuk pengaruh pertumbuhan populasi dan kebutuhan antropogenik. Parameter lain seperti metana dan nitrogen dioksida memang tidak dapat diabaikan, namun meninjau resikonya maka tidak salah jika penanganan karbondioksida ditempatkan lebih awal daripada parameter kedua.

Pada parameter karbondioksida terlihat bahwa angka level asesment penggunaan energi semakin besar dibandingkan inventarisasi sebelumnya.

Hal ini adanya peningkatan penggunaan energi dan kontribusinya menekan kluster lainnya. Salah satunya adalah pada kontribusi emisi bangkitan listrik dan masih adanya penggunaan bahan bakar domestik non LPG. Terjadi perubahan komposisi pada parameter  $N_2O$  ketika pengelolaan limbah memiliki nilai lebih besar dibandingkan penggunaan energi. Hal ini terutama dipengaruhi oleh konversi sanitasi masyarakat perkotaan menjadi fasilitas septic tank sesuai dengan tuntutan kesehatan.

Karakter Kota Surakarta adalah aktivitas antropogenik didominasi oleh kegiatan perkotaan modern yang senantiasa mengkonsumsi energi dari bahan bakar fosil. Hal tersebut tampak jelas pada hasil inventarisasi emisi. Konsumsi energi akan dominan berkontribusi emisi karbondioksida sebagai hasil sampingan atau entropi dari proses pembakaran (*combustion*) sempurna. Berikut adalah analisis kategori kunci pada setiap kategori utama emisi IPCC berdasarkan sektor-sektor potensial yang diinventarisasi.

#### 1. Pengadaan dan penggunaan energi

Tidak ada kegiatan pengadaan energi di Kota Surakarta karena tidak ada pembangkit listrik yang berlokasi di dalam wilayah administratif, sehingga emisi GRK dalam kategori ini hanyalah penggunaan energi. Berdasarkan perhitungan  $L_x,t$  sebenarnya diperoleh dua sektor dominan pada kontribusi emisi karbondioksida yaitu konsumsi listrik dan transportasi jalan raya. Keduanya telah mampu berkontribusi emisi GRK hingga 95%.

Konsumsi listrik tidak dapat dijadikan sebagai kategori kunci karena seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa sifat emisi konsumsi listrik hanya bangkitan karena tidak terjadi pembakaran langsung. Oleh sebab itu, tindakan atau kebijakan yang akan diambil tidak akan berdampak secara langsung pada penurunan emisi pembakaran dari pembangkitan listrik karena akan bergantung pula pada bangkitan wilayah lain.

Sektor yang dapat disebut sebagai kategori kunci sebenarnya dalam kategori penggunaan energi adalah transportasi jalan raya. Pada

karbondioksida sektor ini mempengaruhi 9,88% keseluruhan emisi, pada metana sektor ini berkontribusi hingga 85,07% dan pada nitrogen dioksida sektor ini berkontribusi hingga 97,05%.

Transportasi menjadi kunci keberhasilan pengendalian GRK Kota Surakarta ketika secara realistis emisi bangkitan listrik dilepaskan dan hitungan. Faktor pendorong yang mendukung statement tersebut selain pada penilaian level asesmen adalah tren peningkatan kepemilikan kendaraan pribadi yang belum mampu dikendalikan. Pelajaran masa pandemi menunjukkan bahwa pembatasan mobilitas mengurangi konsumsi bahan bakar namun tidak berpengaruh pada keinginan untuk menambah kepemilikan moda pribadi. Pengembangan wilayah perkotaan cenderung akan meningkatkan aktivitas komuter yang belum terfasilitasi oleh angkutan publik yang memadai dan terintegrasi sepenuhnya.

## 2. Proses industri dan penggunaan produk (IPPU)

Kategori IPPU hanya memunculkan tiga kegiatan sebagai sumber GRK yaitu pelumas industri, pelumas kendaraan dan parafin/wax. Berdasarkan analisis level asesment, key categories pada IPPU adalah penggunaan parafin (59,8%) dan pelumas kendaraan (40,1%). Penggunaan pelumas kendaraan sebagai key categories IPPU akan berkaitan erat dengan transportasi pada kluster penggunaan energi.

## 3. Pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan (AFOLU)

Kegiatan sektor pertanian dan kehutanan tidak menjadi karakter utama atau mata pencaharian utama masyarakat Surakarta. Masyarakat setempat cenderung lebih tertarik dan memiliki ketergantungan pada sektor antropogenik modern seperti perdagangan, jasa dan pariwisata. Oleh sebab itu, berdasarkan hasil inventarisasi, sektor agrikultur dan kehutanan termasuk di dalamnya peternakan tidak muncul sebagai kontributor utama emisi. Kota Surakarta memiliki lahan pertanian sekaligus lahan terbuka bervegetasi sempit dan ketiadaan kawasan hutan dalam wilayah administrasinya.

Kategori kunci pada kategori AFOLU untuk parameter karbondioksida adalah penggunaan lahan (99,95%). Kondisi ini muncul sebagai dampak perubahan penggunaan lahan dengan dominasi peruntukkan antropogenik serta berkurangnya ruang terbuka hijau (vegetasi). Penggunaan lahan memunculkan emisi karbondioksida tambahan karena telah terlampauinya daya dukung dan daya tampung alami lahan untuk menyerap karbon yang mengakibatkan secara riil stok karbon menjadi minus.

Kategori kunci parameter metana pada kategori AFOLU adalah fermentasi enterik (73,67,61%). Fermentasi enterik memiliki nilai lebih tinggi sebagai penanda bahwa lahan sawah di Kota Surakarta dan intensitas pengolahannya sudah semakin terbatas. Hal ini seiring fakta bahwa sawah lestari telah dihapus yang memudahkan alih fungsi lahan sawah.

Kategori kunci pada parameter nitrogen dioksida adalah pengolahan tanah (62,94%) dan pengelolaan kotoran (37,06%). Kondisi tersebut yang dikontribusikan terutama oleh emisi nitrogen langsung secara akibat penambahan pupuk N buatan pada lahan pertanian. Situasi yang didorong oleh harapan untuk meningkatkan produksi tanaman budidaya pada lahan yang semakin sempit.

#### 4. Pengelolaan limbah

Emisi pengelolaan limbah merupakan konsekuensi mutlak dari pertumbuhan populasi pada suatu wilayah. Kecenderungannya adalah semakin modern dan layak sehat fasilitas sanitasi akan mendorong emisi, khususnya parameter metana, semakin tinggi. Pada inventarisasi tahun ini untuk kluster pengelolaan limbah memunculkan kategori kunci pada parameter karbondioksida akibat adanya kegiatan pembakaran sampah meski memiliki intensitas sangat kecil dibandingkan perlakuan lainnya. Pada parameter metana kategori kunci adalah landfill (60,82%) dan sanitasi domestik (39,18%). Posisi landfill saat ini terbantu oleh adanya pengelolaan di luar TPA dan rencana operasional PSEL. Emisi



metana pada penanganan sampah (landfill) masih cukup tinggi disebabkan oleh pola penanganan sampah TPA Putri Cempo yang hanya mengandalkan metode open dumping. Pada parameter nitrogen dioksida kategori kunci adalah sanitasi domestik sebagai sumber emisi tunggal pada kategori pengelolaan limbah.

## **BAB V PENGENDALIAN DAN PENJAMINAN MUTU**

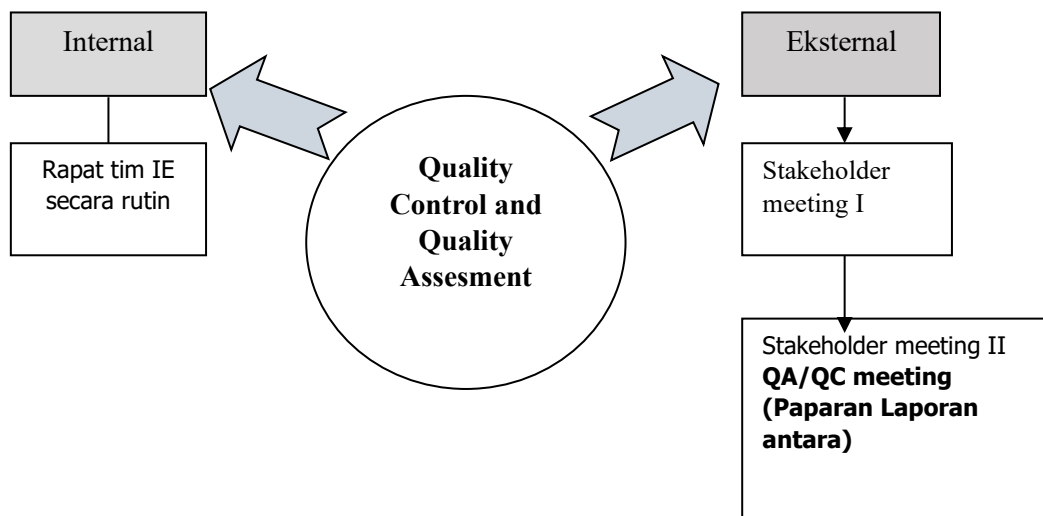
Pengembangan sistem pengendalian dan penjaminan mutu tidak hanya bermanfaat untuk menghasilkan Inventarisasi GRK berkualitas, tetapi juga secara langsung akan menghasilkan data dan informasi pelaksanaan pembangunan yang lebih akurat dan dapat diandalkan. Keberadaan data dan informasi yang akurat sangat diperlukan bagi penyusunan perencanaan pembangunan berkelanjutan.

Pengendalian mutu (QC) merupakan sistem pelaksanaan kegiatan rutin yang ditujukan untuk menilai dan memelihara kualitas dari data dan informasi yang dikumpulkan dalam penyelenggaraan inventarisasi GRK. Kegiatan QC dilakukan oleh orang yang bertanggungjawab dalam pengumpulan data dan informasi tersebut. Penjaminan mutu (QA) adalah suatu sistem yang dikembangkan untuk melakukan review yang dilaksanakan oleh seseorang secara langsung tidak terlibat dalam penyelenggaraan inventarisasi GRK. Kegiatan review akan memverifikasi bahwa penyelenggaraan inventarisasi GRK sudah sesuai prosedur dan standar yang berlaku dan menggunakan metode terbaik sesuai dengan perkembangan pengetahuan terkini dan ketersediaan data.

Pengendalian dan penjaminan mutu dilakukan untuk memastikan kualitas dua variabel yaitu data aktivitas dan hasil hitungan beban emisi. USEPA (2005) menyatakan tentang pentingnya pengendalian mutu dilakukan sejak dasar pelaksanaan yaitu secara internal. Pengendalian mutu (QC) internal disertakan dalam perencanaan awal inventarisasi meliputi :

1. Pengecekan kalkulasi beban emisi untuk meminimalisasi kesalahan (error)
2. Pengecekan pada faktor emisi untuk memastikan kesesuaian penggunaan faktor emisi tersebut, termasuk konversi satuan pada data aktivitas

3. Mendokumentasikan seluruh asumsi atau pendekatan ilmiah yang mungkin dilakukan dalam kalkulasi emisi
4. Membandingkan keselarasan hasil perhitungan emisi antar sumber atau dengan kondisi logis di lapangan atau dengan kondisi emisi kota lain berdasarkan atas karakteristik kegiatannya.



#### **Gambar 48. Mekanisme QA/QC internal dan eksternal**

Tujuan dari pelaksanaan pengendalian mutu antara lain adalah

1. Menyediakan mekanisme pengecekan rutin dan konsisten agar data yang dikumpulkan memiliki integritas, benar dan lengkap
2. Mengidentifikasi dan mengatasi kesalahan dan kehilangan data
3. Mendokumentasikan dan menyimpan semua data dan informasi untuk inventarisasi GRK dan mencatat semua aktivitas pengendalian mutu yang dilakukan.

Pengendalian mutu secara internal dilakukan dengan penyelenggaraan rapat atau koordinasi antar personel tim inventarisasi termasuk di dalamnya surveyor secara berkala per minggunya. Pelaksanaan Stakeholders Meeting dengan instansi atau pihak pemilik data adalah untuk menggaransi penjaminan mutu data. Artinya data yang diperoleh nantinya

merupakan benar benar data sekunder yang dimiliki, diketahui atau disediakan oleh pihak yang berkompeten.

Kendali mutu secara eksternal dilakukan sebelum dan pasca perhitungan beban emisi GRK keseluruhan diselesaikan melalui QA/QC Meeting atau Stakeholder Meeting. Stakeholder meeting I merupakan pertemuan pembuka dengan pihak shareholder yang berperan menyamakan visi dan misi terhadap pelaksanaan inventarisasi GRK. Pada stakeholders meeting I juga dilakukan pengendalian mutu khususnya terhadap sumber-sumber emisi potensial wilayah perkotaan. Stakeholders meeting II dilaksanakan dengan kembali melibatkan pihak pemilik data. Tujuannya yaitu : melakukan pengecekan silang terhadap data yang digunakan dan mengecek perhitungan beban emisi secara bersama-sama.

**Tabel 50. Prosedur umum rencana pengendalian mutu (QC) inventarisasi GRK Kota Surakarta**

<b>Tahapan</b>	<b>Keterangan aktivitas</b>
1	Melakukan pengecekan pendokumentasian asumsi dan kriteria untuk memilih data aktivitas, faktor emisi dan parameter dugaan lainnya
2	Melakukan pengecekan pada input data, transkrip dan referensi
3	Melakukan pengecekan terhadap perhitungan emisi dan serapan karbon
4	Melakukan pengecekan pada kesesuaian penggunaan parameter, satuan dan faktor konversi
5	Melakukan pengecekan pada keteraturan penataan file basis data
6	Melakukan pengecekan konsistensi data pada setiap kategori atau pembahasan
7	Melakukan pengecekan terhadap kelengkapan dan kesesuaian data

- 
- |    |  |
|----|--|
| 8  | Mengecek keteraturan dan kesesuaian transisi data pada setiap analisis perhitungan GRK                 |
| 9  | Melakukan pengecekan kesesuaian secara logis dan ilmiah terhadap penggunaan data tren atau time series |
| 10 | Melakukan pengecekan terhadap sistem dokumentasi internal  |
- 

Sumber : Pengolahan dari dokumen Kementerian Lingkungan Hidup (2011)

Penjaminan mutu (QA) adalah suatu sistem yang dikembangkan untuk melakukan review yang dilaksanakan oleh seseorang yang secara langsung tidak terlibat dalam penyelenggaraan inventarisasi GRK. Penjaminan mutu dilakukan melalui proses pemaparan secara langsung hasil perhitungan dalam dua tahapan yaitu laporan antara dan paparan akhir. Secara khusus kedua tahapan tersebut mengikutsertakan pihak-pihak terkait untuk memberikan masukan dalam hubungannya dengan hasil inventarisasi secara bertahap yaitu pada laporan antara dengan hanya melibatkan Dinas Lingkungan Hidup setempat sebagai penanggung jawab dan pada paparan akhir dengan melibatkan keseluruhan shareholder. Kedua kegiatan juga berperan sebagai pengendalian mutu (QC). Penjaminan mutu terutama akan difokuskan pada kategori kunci sebagai penanda atau milestone bagi upaya manajemen kualitas udara setempat yang akan dirumuskan berbasis hasil inventarisasi.

## **BAB VI RENCANA PERBAIKAN PENYELENGGARAAN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA**

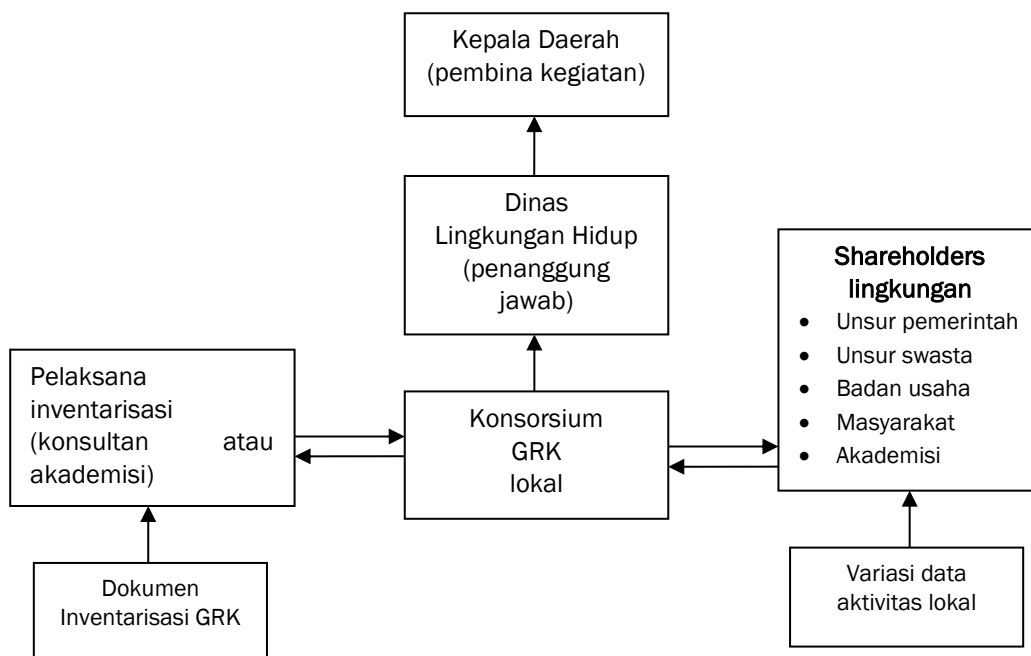
### **A. Perbaikan Koordinasi Data Lokal**

Kota Surakarta memiliki data aktivitas yang tersebar pada beberapa shareholder lingkungan, bersifat shareholder lokal dengan cakupan lokal maupun shareholder regional dan nasional. Penyusunan dokumen Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kota Surakarta 2018 menjadi titik awal baru bagi perhitungan emisi, dapat diterapkan sebagai baseline year data untuk perhitungan tahun-tahun berikutnya. Oleh sebab itu, instansi instansi terkait mulai dapat secara rutin mendokumentasi data-data terkait dengan bidang penguasaan yang akan secara rutin digunakan, minimal adalah sesuai atau selaras dengan sektor yang telah diinventarisasi pada tahun dasar.

Peran dari dokumentasi secara mandiri adalah memudahkan penyerahan dan pengumpulan data pada tahun berikutnya. Adanya dokumentasi sekaligus akan menjadi sumber pengecekan bagi perhitungan ketidakpastian maupun penjaminan kualitas dari dokumen inventarisasi GRK. Lebih jauh melalui data yang telah didokumentasi dengan baik akan dapat ditentukan model-model emisi lokal secara sederhana yang akan mengarah sebagai landasan penyusunan faktor emisi lokal. Hal tersebut berperan dalam meningkatkan akurasi perhitungan hingga mampu untuk mendekati norma akurasi hitungan Tier III. Time series data untuk keperluan pemodelan, secara statistik, tentu saja tidak hanya dalam rentang pendek 3-5 tahun, namun pada rentang periode dokumentasi lebih panjang hingga satu atau dua dekade.

Pemilik data yaitu shareholders lingkungan Kota Surakarta merupakan elemen terpenting dari inventraisasi GRK, terutama apabila mempertahankan pendekatan top down yang simpel. Oleh sebab itu

kesepahaman visi, kesatuan maksud dan tujuan antar shareholders penting untuk diciptakan. Kesepahaman dan kesatuan tersebut hanya dapat terjadi ketika koordinasi antar instansi telah berjalan dengan baik. Dinas Lingkungan Hidup Surakarta wajib mengambil peran sebagai pusat koordinasi termasuk dalam penyatuan visi tentang data aktivitas. Koordinasi yang telah terjalin pada pengumpulan data tahun dasar semestinya dipertahankan dan disempurnakan. Jumlah instansi maupun elemen shareholders sebisa mungkin untuk ditambah yang bermanfaat bagi pengayaan dan pelengkapan data maupun uncertainties.



**Gambar 49. Skema dokumentasi dan koordinasi shareholders lokal**

Berkaitan dengan upaya untuk meningkatkan koordinasi maupun dokumentasi terhadap data aktivitas yang konsisten, maka penting untuk dilakukan pembentukan konsorsium shareholder gas rumah kaca lokal. Konsorsium tersebut benar-benar melibatkan personal yang menguasai atau setidaknya memiliki aksesibilitas terhadap data di setiap elemen shareholders. Konsorsium tersebut dapat berisi elemen lengkap shareholders mencakup ; unsur pemerintah, badan usaha, unsur swasta,

unsur masyarakat dan akademisi. Peran konsorsium lokal adalah sebagai penghubung sekaligus kompilator data aktivitas yang telah didokumentasikan pada masing-masing instansi. Anggota konsorsium akan terus dilibatkan dan dipertahankan dalam kegiatan inventarisasi sehingga akan muncul konsistensi, keberlanjutan dan evaluasi diri yang lebih sempurna seiring dengan pemahaman yang tinggi dari masing-masing personel dalam konsorsium. Pusat pertanggungjawaban konsorsium berada di bawah Dinas Lingkungan Hidup dengan mengamanahkan pembinaan pada Kepala Daerah.

Pelengkapan data menjadi hal penting untuk mekanisme penyempurnaan mitigasi emisi GRK. Data tersebut termasuk pada kegiatan kegiatan yang bersifat khas lokal termasuk untuk kota Surakarta adalah industri batik rakyat. Saat ini belum ada data aktivitas dari industri ini yang memiliki potensi emisi cukup besar dari penggunaan bahan bakar serta IPPU (wax).

## **B. Perbaikan Metode Koleksi Data**

Koleksi data dengan metode top down dirasa beresiko tinggi terhadap terjadinya ketidakpastian. Artinya, hasil dari estimasi emisi kemungkinan besar akan berada pada posisi *overrated* atau *underrated* terhadap kondisi sebenarnya. Pendataan *top down* akan serta merta menghilangkan gambaran tentang kondisi lingkungan lokal yang lengkap. Sebagai contoh adalah perhitungan emisi transportasi jalan raya dengan metode penjualan bahan bakar yang akan mengabaikan kondisi kota sebagai wilayah transit atau pusat kegiatan kawasan *hinterland*.

Metode yang dianggap lebih faktual adalah bottom up yang dapat dikombinasikan dengan data sekunder sebagai pembanding. Metode bottom up akan langsung mencari data secara mendetail pada lapangan sehingga dapat ditentukan target Tier hitungan yang harus dicapai berdasarkan ketersediaan data lapangan. Permasalahan sebenarnya sebagai pemicu tingkat emisi sektor tertentu akan lebih detail teridentifikasi



melalui metode bottom up. Bagi kota dengan karakter seperti Surakarta, memiliki peran sebagai kawasan pusat ekonomi hinterland dan batas antar wilayah yang kabur, maka pendekatan bottom up berperan untuk mengurangi bias perhitungan.

Kelemahan metode bottom up adalah kebutuhan terhadap sumber daya berupa modal, tenaga maupun waktu yang lebih besar dibandingkan aplikasi top down. Oleh sebab itu, jikalau metode bottom up masih belum dapat diaplikasikan akibat keterbatasan sumber daya, maka solusi yang dapat ditempuh adalah dengan memperbaiki kualitas data. Perbaikan tersebut dapat dilakukan dengan pemetaan dan penyusunan kebutuhan data aktivitas sejak dini untuk mencapai suatu kualitas tertentu. Data aktivitas pada akhirnya wajib distandarkan kedalaman faktanya dan menjadi kewajiban bagi setiap shareholders pemilik data untuk melengkapi data sesuai dengan perencanaan awal.

### **C. Peningkatan Metode Perhitungan dan Analisis Data**

Metode perhitungan emisi GRK bersumber pada satu formula baku emisi yaitu perkailaian antara data aktivitas dengan faktor emisi. Perbedaan pada hasil perhitungan adalah Tier atau level akurasi hitungan yang sepenuhnya bergantung pada kompleksitas data aktivitas dan ketersediaan faktor emisi lokal. Satu poin yang dapat dikejar adalah penyediaan data aktivitas yang lebih kompleks untuk menggapai Tier yang lebih meningkat.

Salah satu alternatif yang dapat ditempuh untuk meningkatkan akurasi perhitungan adalah dengan mengaplikasikan *assistance software*. *Assistance software* atau *worksheet* dimaksud antara lain seperti model emisi metana landfill sampah IPCC (telah diterapkan dalam inventarisasi ini) dan Mobilev software untuk mengestimasi emisi transportasi jalan raya dengan pendekatan Tier III. Tentu saja, sekali lagi penggunaan *software* atau *worksheet* tersebut membutuhkan ketersediaan data lebih lengkap atau bahkan time series pada periode yang panjang.

Analisis data dalam inventarisasi GRK adalah berbasis kuantitatif yang bermakna minimal ada pembahasan terhadap hasil secara kuantitatif atau menyajikan data kuantitatif dalam format interaktif. Meskipun demikian, akan lebih baik apabila analisis data diperkaya secara kualitatif dengan merujuk pada rona lingkungan lokal, kajian pembandingan pada kota lain, expert judgement maupun studi literatur terkait. Hal tersebut tentunya akan membantu perencanaan manajemen kualitas udara dalam rangka reduksi emisi.

Peningkatan kedalaman analisis data dapat dicapai melalui penambahan sub sektor dalam inventarisasi emisi. Sebagai contoh pada penggunaan energi sektor perdagangan, sesuai dengan karakter Surakarta dapat dipecah dalam sub sektor seperti perhotelan, pertokoan hingga perkantoran. Selain itu, dapat pula ditambahkan sektor jasa berupa kesehatan dan pendidikan mempertimbangkan status Surakarta sebagai pusat pelayanan wilayah hinterland. Kesulitan pelengkapan data pada sektor atau subsektor baru dapat diatasi menggunakan metode-metode uncertainties seperti interpolasi dan generalisasi data meskipun pada tahun berikutnya wajib tersedia data riil berbasis dokumentasi resmi pemerintah atau asosiasi terkait. Penambahan sumber emisi tersebut akan membuka lebih luas tentang beban emisi yang ditanggung wilayah setempat dan upaya-upaya terstruktur untuk mengatasinya. Peningkatan analisis terhadap emisi juga dapat dicapai melalui kajian data time series serta analisis korelasi-regresi terhadap variabel-variabel yang diperkirakan mempengaruhi perubahan nilai emisi, terutama pada kategori kunci.

#### **D. Perbaikan Quality Assessment (QA)**

Kegiatan inventarisasi GRK pada tahun dasar di Kota Surakarta mengandalkan stakeholdermeeting dan pertemuan internal sebagai sarana quality assesment. Pada masa mendatang hal ini harus dilakukan dengan melibatkan ahli atau expert dalam inventarisasi emisi yang bersifat independen. Artinya adalah expert tersebut tidak mengambil peran dalam

inventarisasi atau perhitungan bahkan jika mungkin expert yang berasal dari luar wilayah Surakarta.

### **E. Konsistensi dan Kontinuitas**

Pada akhirnya elemen terpenting dari sebuah kegiatan inventarisasi GRK adalah konsistensi dan kontinuitas. Gas Rumah Kaca adalah isu penting pada dunia modern dengan tuntutan pada seluruh negara dan wilayah lebih kecil di dalamnya untuk turut serta dalam upaya mitigasi dan reduksi. Dampak GRK nyatanya tidak kecil dalam lingkungan modern bahkan dipandang sebagai pemicu utama perubahan iklim. Oleh sebab itu diperlukan konsistensi dan kontinuitas pelaksanaan inventarisasi GRK dengan terlebih dahulu menentukan periode ideal untuk re-inventarisasi setelah pelaksanaan tahun dasar kegiatan. Kontinuitas kegiatan harus dicapai melalui peningkatan kualitas hasil yang dicapai berbasis pada akurasi estimasi emisi. Konsistensi diwujudkan dengan pelaksanaan secara teratur dan konsisten pada metode yang digunakan, pengelompokan emisi hingga penyediaan dan kelengkapan data aktivitas emisi.

### **F. Evaluasi Diri**

Evaluasi diri penting dilaksanakan oleh pelaksana inventarisasi emisi untuk memperbaiki atau meningkatkan kualitas kegiatan pada masa mendatang. Evaluasi diri dapat dilakukan dengan melakukan pencatatan dan dokumentasi terhadap masukan baik pada saat stakeholder meeting maupun dari expert judgement.

Evaluasi diri juga perlu dilakukan oleh penyelenggara inventarisasi emisi terutama berkaitan dengan kelancaran pengumpulan data untuk memperbaiki metode pendekatan pada tiap shareholders (telah disarankan melalui pembentukan konsorsium GRK). Evaluasi diri juga perlu dilakukan oleh masing masing shareholders terkait kepemilikan, kelengkapan dan kontinuitas data mengingat dari data tersebut estimasi dan perencanaan mitigasi emisi berasal.

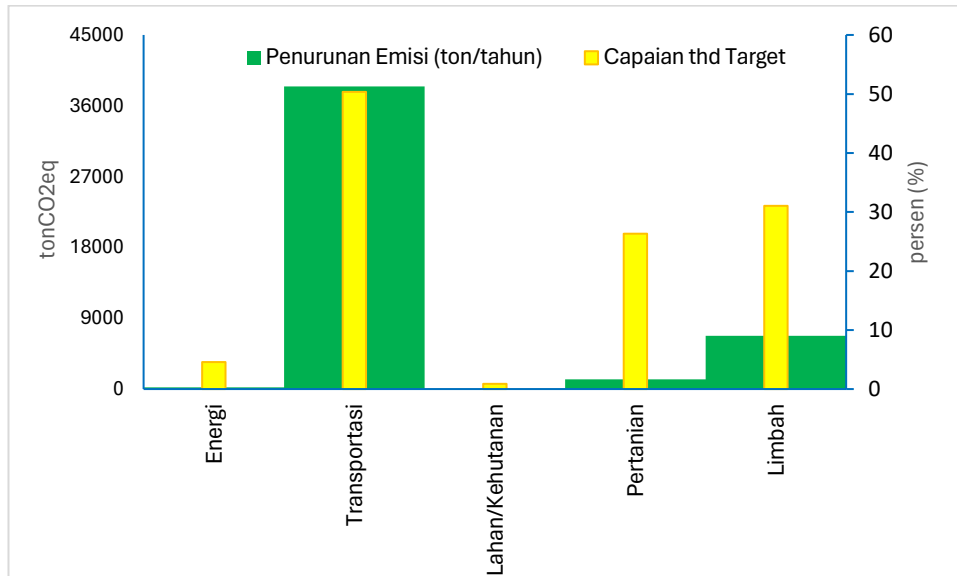
## **BAB VII EVALUASI DAN REKOMENDASI RENCANA AKSI MITIGASI GAS RUMAH KACA**

### **A. Rangkuman Evaluasi Rencana Aksi Daerah (RAD) GRK Kota Surakarta 2018-2023**

RAD GRK disusun Kota Surakarta sebagai bentuk perencanaan mitigasi GRK merespon upaya global maupun nasional dalam perubahan iklim. Dokumen ini disusun pada tahun 2018. Pada tahun tersebut nilai GRK Kota Surakarta 1360887,39 ton CO<sub>2</sub> ekuivalen. Inventarisasi GRK tahun 2023 menunjukkan nilai yang meningkat.

Peningkatan nilai GRK menjadi kondisi yang sebenarnya normal. Hal ini tidak lepas dari populasi sebagai driving factor. Populasi terus mengalami peningkatan akan selaras dengan kenaikan kebutuhan manusia. Kondisi tersebut akan memicu peningkatan aktivitas antropogenik dalam konteks ragam maupun intensitas. Tujuan RAD GRK lebih tepat dikatakan sebagai upaya untuk memitigasi rasio peningkatan dengan target capaian reduksi tertentu. Implementasi RAD GRK dilakukan pada 4 kluster GRK berdasarkan IPCC yaitu : penggunaan dan produksi energi; industrial process dan product uses (IPPU); agrikultural, kehutanan dan penggunaan lahan (AFOLU) serta pengelolaan limbah.

Berdasarkan hasil Pemantauan, Evaluasi dan Pelaporan, maka capaian dari implementasi RAD GRK Tahun 2018-2022 mencapai 42,25% dari target baseline atau setara dengan 46.688,98 ton. Detail evaluasi efektivitas implementasi pada sektor atau sub sektor ditampilkan pada Gambar 44.



**Gambar 50. Penurunan emisi dan efektivitas capaian implementasi RAD GRK Kota Surakarta tahun 2018-2023**

Sektor yang berkontribusi paling **signifikan** terhadap penurunan emisi di Kota Surakarta yaitu **sub sektor transportasi** dengan adanya peningkatan transportasi publik berupa BST, feeder, integrasi intermoda, digitalisasi sistem layanan hingga pembangunan pedestrian. Meskipun demikian capaian sektor transportasi masih jauh dari signifikan jika dibandingkan GRK yang diproduksi. terdapat beberapa program yang diusulkan untuk dihapus pada RAD GRK 2018 yaitu terkait sub sektor pertanian. Adapun program-program yang diusulkan untuk dihapus yaitu : Unit Pengolah Pupuk Organik (UPPO), Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT), dan Penggunaan Varietas Rendah Emisi (Bappeda Kota Surakarta, 2023). Kebijakan penambahan lahan vegetasi (pertanian) akan terbatas oleh penghapusan status sawah mandiri. Perkotaan Surakarta dipandang telah settle sehingga sulit untuk menambah lahan vegetasi secara kuantitatif.

Laporan Review RAD GRK Surakarta 2018-2023 mengkonfirmasi bahwa mayoritas rencana implementasi telah terlaksana. Rencana aksi daerah penurunan emisi GRK yang telah terlaksana yaitu: penggunaan lampu hemat energi (LED/CFL), efisiensi lampu perkantoran, pembangunan

dan operasional PSEL, Pembangunan ATCS/ITS, pembangunan semi transit (BRT), peremajaan angkutan umum, pembangunan unit pengolah Pupuk Organik (UPPO), pengelolaan tanaman terpadu (PTT), penggunaan Varietas Rendah Emisi, pembangunan TPS 3R, pembangunan Bank Sampah. Implementasi aksi tersebut masih terbatas pada aktor pemerintah daerah, belum memasukkan pendataan pada aksi yang melibatkan pelaku usaha dan masyarakat. Beberapa aksi lain juga telah dilaksanakan meskipun belum termuat dalam dokumen RAD GRK diantaranya yaitu Car Free Day, Penggunaan Energi Baru Terbarukan (PE EBT), Pengembangan urban farming, serta pemanfaatan biogas ternak (Bappeda Kota Surakarta, 2023).

Dokumen review RAD GRK mencatat beragam tantangan dan kendala yang dihadapi dalam implementasi rencana aksi sebagai berikut.

1. **Tantangan Finansial.** Beberapa aksi mitigasi membutuhkan anggaran biaya yang besar mulai dari biaya pengadaan hingga operasional dan perawatan. Penyediaan subsidi untuk menarik peranserta masyarakat dalam program termasuk dalam tantangan finansial bagi pemerintah daerah.
2. **Tantangan Kewenangan.** Terdapat 2 lingkup kewenangan yang menjadi tantangan implementasi RAD GRK Kota Surakarta yaitu kewenangan operasional dan kewenangan dalam perijinan. Berberapa kegiatan memiliki keterbatasan kewenangan dalam operasional karena berada pada hierarki yang lebih tinggi (pemerintah provinsi atau pusat).
3. **Tantangan teknis dan teknologi.** Perlu tindak lanjut untuk mendetailkan RAD GRK agar memudahkan dalam implementasi termasuk analisis pertimbangan teknologi.
4. **Tantangan Kebijakan.** Sampai saat ini belum ada kebijakan yang kuat untuk mendorong pelaksanaan RAD GRK, meskipun isu perubahan iklim telah diintegrasikan dalam dokumen perencanaan.

5. **Tantangan Sumber Daya Manusia.** Ketiadaan tim teknis yang berperan untuk memantau, memonitoring dan mengevaluasi pelaksanaan RAD GRK pada berbagai sektor.

Dokumen Review RAD GRK Kota Surakarta merekomendasikan beberapa kebijakan, rencana maupun program (KRP) untuk mengoptimalkan implementasi. Secara umum, KRP tersebut berfokus pada 5 poin utama mencakup.

1. Ruang lingkup sumber emisi dan sinkronisasi data Inventarisasi GRK
2. Rekomendasi penambahan opsi aksi mitigasi potensial
3. Pelibatan masyarakat dan sektor swasta
4. Pembentukan tim (satuan tugas khusus) stakeholders Kota Surakarta untuk Isu Mitigasi Perubahan Iklim
5. Integrasi Dokumen RAD GRK dalam dokumen KLHS maupun perencanaan lingkungan lainnya

Beberapa masukan opsi mitigasi potensial untuk reduksi rasio peningkatan GRK seperti : penggunaan dan optimalisasi EBT, efisiensi energi, pemetaan potensi EBT, pemberian insentif (sub-sektor energi); promosi transportasi publik, transportasi berkelanjutan, kendaraan ramah lingkungan (sub-sektor transportasi); konservasi lahan hijau, penanaman pohon, urban farming, rencana tata ruang hijau (sub-sektor lahan).

## **B. Evaluasi Rencana Aksi Mitigasi**

Kota Surakarta telah melaksanakan beragam mitigasi untuk menurunkan rasio gas rumah kaca lokal. Program program tersebut telah berjalan secara konsisten dalam jangka waktu yang panjang. Mayoritas program berupa pembangunan maupun penyediaan infrastruktur terutama pada pengelolaan transportasi lokal. Deskripsi ini menunjukkan bahwa sebenarnya mitigasi GRK telah menjadi agenda penting bagi pemerintah Kota Surakarta. Pemkot Surakarta melalui berbagai instansi telah melaksanakan beragam program sebagai upaya mitigasi GRK dengan berpedoman pada pembangunan berkelanjutan.

Program mitigasi GRK Kota Surakarta beberapa telah menunjukkan upaya pemberdayaan masyarakat. Program tersebut seperti kegiatan seperti *Car Free Day*, Kampung Iklim hingga sekolah adiwiyata. Arahan ini telah sesuai karena masalah lingkungan tidak dapat diatasi sendirian oleh pemerintah. Masyarakat menjadi penentu dalam efektivitas dan keberhasilan program tersebut.

Permasalahannya adalah program mitigasi yang dilakukan belum mencapai efektivitas reduksi GRK lokal. Sebagai contoh adalah penyediaan transportasi publik (Batik Solo Trans) dengan kualitas maupun kuantitas layanan prima namun tidak mampu mengurangi minat masyarakat pada penggunaan moda pribadi. Pada sektor industri, terdapat kelompok industri tertentu yang kurang berkenan mengubah jenis bahan bakarnya karena berkaitan dengan kualitas produk, pemasaran dan profit yang didapat. Pengecualian terjadi pada pengendalian emisi metana landfill yang memiliki probabilitas besar untuk efektif ketika PSEL yang mengkonversi sampah menjadi listrik beroperasi tahun depan. Inefektivitas pada capaian program menyebabkan nilai emisi GRK Kota Surakarta masih menunjukkan rasio kenaikan yang cukup stabil dengan tren linier. Artinya kenaikan tersebut belum mampu di rem dengan ditandai oleh grafik yang mulai melandai. Inefektivitas tersebut diasumsikan sebagai dampak partisipasi masyarakat yang rendah dalam mendukung program.

Problematika pada program mitigasi GRK Kota Surakarta dapat dibagi pada beberapa faktor penyebab. Faktor faktor tersebut antara lain mencakup.

1. Socioengagement dan Peran Serta Nyata Masyarakat

Masalah *socioengagement* adalah tentang penerimaan dan willingness masyarakat untuk implementasi sebuah program. Pemicu kondisi ini adalah sebagian besar program masih bersifat adoptif belum adaptif. Masyarakat lokal belum mendapatkan sosialisasi maupun pendekatan implementatif yang sesuai dengan karakter sosiokultural maupun lingkungan Surakarta. Kadangkala program yang diberikan dianggap



mengganggu atau memaksa masyarakat untuk kehilangan kenyamanan dalam persepsinya. Pemerintah sebenarnya telah menyediakan program yang bagus dengan sasaran efektivitas mitigasi GRK terukur. Namun, atensi masyarakat masih kurang yang berdampak pada pencapaian program tidak sesuai dengan harapan. Socioengagement yang lemah juga mengindikasikan pemahaman masyarakat tentang urgensi mitigasi GRK dan dampak perubahan iklim masih lemah.

Contoh kasus ini adalah pada program transportasi publik. Batik Solo Trans sebenarnya merupakan transportasi publik dengan kualitas premium. Moda ini memiliki armada yang baru dan nyaman serta didukung infrastruktur memadai seperti feeder, halte hingga media informasi digital. Namun, hingga saat ini dapat diamati bahwa BST belum sepenuhnya optimal untuk menekan angka penggunaan kendaraan pribadi hingga GRK transportasi Surakarta.

## 2. Ketiadaan Forum atau Satuan Tugas Khusus Perubahan Iklim

Data terkait lingkungan masih belum seluruhnya terlengkapi di Kota Surakarta. Hal ini termasuk pada data GRK dan perubahan iklim. Kondisi tersebut akan menyulitkan pada kegiatan pengelolaan dan perlindungan lingkungan, terutama terkait perencanaan dan evaluasi. Aksesibilitas data pun belum sepenuhnya mudah karena kepemilikan data yang tersebar dan tidak seragam. Belum seluruh data terkait dengan sumber GRK tersedia dan terdokumentasi secara baik. Salah satu contoh adalah konsumsi bahan bakar dan pendukung proses industri pada batik. Hal ini cukup memprihatinkan mengingat industri batik tradisional merupakan salah satu penciri kota dan jumlah pegiatnya cukup banyak. Aksesibilitas beberapa data aktivitas cukup sulit dijangkau karena tidak dimiliki instansi lokal dan membutuhkan proses birokrasi rumit. Kota Surakarta hingga saat ini tidak memiliki konsorsium atau satuan tugas yang dikhususkan untuk menangani masalah perubahan iklim, termasuk dalam penyediaan data satu pintu.

## 3. Dilema Ekonomi vs Lingkungan

Penanganan masalah lingkungan membutuhkan sinergi antar stakeholder. Kondisi di Kota Surakarta seringkali memunculkan gambaran konflik antar kepentingan terkait penanganan lingkungan. Inti konflik selalu pada masalah klasik tentang upaya peningkatan perekonomian menghadapi konservasi. Salah satu contoh adalah alih fungsi lahan yang kerap kali menimbulkan conflict of interest antara mempertahankan ruang terbuka hijau (RTH) dan pembangunan infrastruktur. Pada situasi tersebut masyarakat kerap dipaksa untuk menerima persepsi bahwa kepentingan pembangunan ekonomi akan menjadi prioritas utama.

Pasca pandemi, permasalahan ekonomi vs lingkungan dihadapi Surakarta terkait rebound effect pariwisata. Pada tahun 2022 cukup banyak event berskala nasional dan internasional diselenggarakan. Event tersebut menarik banyak wisatawan dengan kontribusi peningkatan perekonomian masyarakat. Namun, penyelenggaraan event juga memberikan tekanan lingkungan seperti peningkatan emisi transportasi dan sampah. Kondisi tersebut belum sepenuhnya menjadi bagian perencanaan jangka panjang kota. Padahal, pelaksanaan event maupun kedatangan wisatawan ke Kota Surakarta berpotensi semakin bertambah, sehingga dampak lingkungan yang timbul layak untuk mulai diperhitungkan.

#### 4. Konsistensi dan Keberlanjutan

Program mitigasi di Kota Surakarta kerap kali menghadapi permasalahan pada konsistensi. Konsistensi ini lebih pada kemauan masyarakat untuk mempertahankan komitmen dan tujuan awal pada sebuah program. Pencapaian sebuah target kerap kali menjadi garis batas konsistensi masyarakat. Sebagai contoh adalah pada Proklamasi maupun Adiwiyata. Pencapaian prestasi level provinsi bahkan nasional terkadang menurunkan motivasi untuk mempertahankan upaya konservasi yang telah dilakukan.

#### 5. Kesamaan Visi dalam Menyikapi Perubahan Iklim

Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan pemicu perubahan iklim. Kondisi GRK pada era antropogenik modern menunjukkan tren yang terus meningkat, selaras dengan peningkatan temperatur. Vsi antar stakeholder terkait resiko, bahaya, kecenderungan maupun mitigasi GRK masih beragam di Kota Surakarta. Kerapkali terjadi konflik kepentingan akibat perbedaan persepsi terkait urgensi maupun implementasi mitigasi antar institusi.

Inventarisasi GRK tahun sebelumnya telah mengajukan beberapa rekomendasi untuk peningkatan mitigasi. Berikut adalah update evaluasi pada rekomendasi tersebut.

**Tabel 51. Evaluasi rencana aksi mitigasi gas rumah kaca Kota Surakarta 2021**

No	Kluster kegiatan	Rekomendasi	Detail kegiatan	Usulan instansi penyelenggara	Evaluasi kegiatan
1	Penyelenggaraan inventarisasi emisi	Reinventarisasi dengan metode bottom up	Inventarisasi yang dilakukan dengan basis data primer (berbeda dengan inventarisasi GRK yang menggunakan basis data sekunder/reference base), terakhir dilaksanakan pada tahun 2014	Dinas Lingkungan Hidup	Belum terlaksana, Inventarisasi secara bottom menjadi sisipan di laporan inventarisasi GRK 2022 pada evaluasi emisi transportasi komuter
		Pembuatan fasilitas website dan cloud untuk penyimpanan data aktivitas GRK	Website dan fasilitas penyimpanan daring untuk menampung dan mendokumentasikan data aktivitas GRK	Dinas Komunikasi dan Informatika	Belum terlaksana
		Pembentukan task force climate change	Tim kerja yang khusus menangani mitigasi perubahan iklim termasuk penyediaan data inventarisasi emisi. Tim ini berperan untuk menyelaraskan pembangunan dengan kepentingan mitigasi	Pemerintah Kota Surakarta	Belum terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			maupun adaptasi perubahan iklim		
		Digitalisasi proses koleksi data	Digitalisasi data menjadi kondisi wajar pada saat ini, Melalui digitalisasi tersebut, data lebih rapi terdokumentasi dan memudahkan proses pengumpulan. Kebutuhan aplikasi khusus sebagai wadah koleksi data aktivitas untuk perhitungan GRK adalah kebutuhan urgent. Saat ini pemerintah pusat memiliki signsmart namun Kota Surakarta dapat membuat sebuah aplikasi khusus untuk detail data aktivitas lokal.	Dilaksanakan oleh DLH Kota Surakarta	Terlaksana namun belum dalam bentuk aplikasi
		Publikasi informasi perubahan iklim	Penyampaian informasi hasil inventarisasi dan kecenderungan GRK pada masyarakat dengan mengundang media massa mainstream maupun melalui website DLH. Aksi ini untuk mengangkat kepedulian	Dilaksanakan oleh DLH Kota Surakarta dan Pemkot Surakarta	Terlaksana namun belum dalam bentuk aplikasi

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			masyarakat dan keikutsertaannya dalam program mitigasi GRK maupun perubahan iklim.		
		Integrasi Inventarisasi GRK dalam dokumen perencanaan pembangunan daerah jangka panjang	Pemerintah perlu menekan dan memastikan bahwa dokumen GRK telah masuk sebagai bagian dari perencanaan jangka panjang seperti RPPLH, KLHS RTRW dan KLHS RDTR.	DLH Kota Surakarta, Bappeda Kota Surakarta	Terlaksana
2	Kluster Pengadaan dan Penggunaan Energi	Kajian rutin efektivitas penyelenggaraan transportasi publik dan infrastruktur pendukung di Kota Surakarta	Kajian untuk menghitung, memonitoring dan melakukan evaluasi pada penyelenggaraan transportasi publik agar tidak menjadi Jevons Paradox dan memunculkan masalah baru pada GRK Kota Surakarta	Dinas Perhubungan	Terlaksana
		Melakukan kampanye penggunaan moda transportasi publik	Kampanye untuk meningkatkan pengguna transportasi publik dengan melibatkan instansi, sekolah, perguruan tinggi, pusat perbelanjaan hingga industri yang ada di Kota Surakarta.	Dinas Perhubungan, akademisi	Terlaksana namun belum efektif

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			Kegiatan dapat berupa kewajiban untuk menggunakan transportasi publik, penyediaan rute dan waktu layanan khusus hingga pemberian insentif pada konsumen		
		<i>Shifting Transportation</i>	<p>Kegiatan penutupan ruas jalan di CBD (Slamet Riyadi atau ruas Jl Dr Rajiman di bagian Pasar Klewer) dari penggunaan kendaraan pribadi. Hal ini berbasis dari interpretasi citra pada temperatur maupun pemetaan emisi hasil inventarisasi 2014 yang menunjukkan kawasan tersebut memiliki emisi tertinggi.</p> <p>Penggunaan kendaraan pribadi dapat digantikan dengan penyediaan kendaraan publik dan sepeda serta dukungan pedestrian yang memadai untuk fasilitas pejalan kaki.</p>	Pemerintah Kota Surakarta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Belum terlaksana, pembatasan kendaraan pada jalur tertentu hanya berwujud CFD atau CFN yang masih berupa car free hours</li> <li>• Terlaksana belum optimal karena peran serta masyarakat rendah</li> </ul>

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			Kendaraan pribadi akan disediakan tempat parkir khusus.		
		Pembatasan akses kendaraan pribadi komuter yang memasuki Kota Surakarta	Hal ini dilaksanakan melalui kerjasama dengan pemerintah daerah di kabupaten kabupaten yang masuk Greater Solo. Solusi adalah dengan menyediakan terminal, posko atau halte kendaraan umum pada batas batas kota yang dilengkapi fasilitas parkir kendaraan pribadi. Solusi juga dapat dilakukan dengan optimalisasi kereta komuter Batara Kresna, KRL CL dan KA BIAS	Pemerintah Daerah se Solo Raya	Belum terlaksana
		Penambahan ruas jalur sepeda	Ruas sepeda yang aman dan tidak saling menginterupsi dengan pengguna jalan lain semestinya dapat menjangkau setiap fasilitas pemerintahan, perbelanjaan dan sekolah	Dinas Perhubungan	Terlaksana
		Pelengkapan jalur pedestrian	Jalur pedestrian harus dibangun dengan dilengkapi	DPUPR	Terlaksana



**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			taman untuk optimalisasi RTH terutama pada jalur jalur utama atau kawasan wisata di Kota Surakarta		
		Pendataan konsumsi bahan bakar pada industri menengah kecil	Pendataan dilakukan terutama yang menjadi ciri khas Kota Surakarta (Batik tradisional, makanan, <i>street food vendor</i> ). Data mencakup pada jenis dan konsumsi tahunan. Hal ini mempertimbangkan bahwa mayoritas industri di Surakarta adalah menengah kecil)	DiskopUMKM, Dinas Perindustrian dan Perdagangan	Terlaksana namun belum optimal
		Konversi LPG	Konversi pada jenis bahan bakar memasak rumah tangga menjadi 100% LPG	Pemerintah Kota Surakarta	Terlaksana
		Climate Award untuk Industri Ramah Lingkungan	Pemberian apresiasi dan insentif (mungkin bisa melalui bantuan akses promosi, kontrak eksklusif hingga ecolabel) bagi industri yang bisa menerapkan pendekatan produksi ramah lingkungan terutama	Pemerintah Kota Surakarta, Dinas Perdagangan	Belum terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			berkaitan dengan upaya mitigasi perubahan iklim		
		Gerakan Hemat Listrik	Kampanye untuk menghemat listrik dengan sasaran rumah tangga	PLN, Dinas Lingkungan Hidup	Terlaksana
		Festival Iklim	Festival pada periode tertentu di musim panas (misal selama seminggu) untuk mengedukasi tentang ancaman dampak perubahan iklim serta mempromosikan program mitigasi perubahan iklim lokal, nasional maupun global yang diugabungkan dengan konsep entertainment untuk menarik minat masyarakat	Pemerintah Kota Surakarta	Belum terlaksana
2	Kluster <i>Industrial Process and Product Uses (IPPU)</i>	Pendataan Pelumas dan Wax	Pendataan penggunaan pelumas dan wax secara khusus pada industri besar, menengah maupun kecil. Untuk wax secara khusus adalah pada industri batik tradisional	Dinas Lingkungan Hidup, Dinas Tenaga Kerja dan Perindustrian	Belum terlaksana
3	Kluster	Urban Farming	Optimalisasi lahan privat untuk penyediaan ruang	Dinas Pertanian dan Peternakan	Terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



Agrikultur, Kehutanan dan <i>Land Use</i>		terbuka hijau dalam format pembudidayaan tanaman pangan atau obat		
	Konservasi RTH	Optimalisasi pemanfaatan dan pelestarian RTH melalui pemeliharaan tanaman yang ada maupun penyediaan jenis tanaman tepat guna yang sesuai dengan masalah lingkungan. Pemanfaatan RTH bertujuan untuk meningkatkan peranserta masyarakat	Dinas Lingkungan Hidup	Terlaksana belum optimal
	Aplikasi website Pohon	Upaya melindungi pohon pohon yang berusia tua dan potensial bagi pengendalian siklus karbon melalui pemanfaatan media digital dengan metode partisipatif dan edukatif	Dinas Lingkungan Hidup	Belum terlaksana
	Kampung Hijau Award	Penghargaan bagi komunitas masyarakat (kampung) lokal terhadap upaya pemeliharaan serta optimalisasi ketersediaan RTH di wilayahnya	Pemerintah Kota Surakarta	Terlaksana sebagai bagian Proklim

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



		Pelaksanaan ekomodifikasi dan pemanfaatan lahan terbengakalai	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ekomodifikasi, dilaksanakan dengan membangun taman taman pada <i>grey space</i> (kawasan terbangun) melalui modifikasi permukaan maupun optimalisasi pemanfaatan lahan kosong yang ada.</li> <li>• Pemanfaatan brownfield sites sebagai lahan RTH alternatif sementara</li> </ul>	Pemerintah Kota Surakarta, DLH Kota Surakarta	Belum terlaksana
		Perilisan regulasi perlindungan pohon	Regulasi ini terutama untuk melindungi jenis jenis pohon yang telah tumbuh dan berkembang baik di perkotaan dari penebangan. Regulasi juga akan lebih terarah melindungi jenis yang mempunyai fungsi ekologis penting seperti <i>Ficus benjamina</i> , <i>Pithecelobium dulce</i> , <i>Tamarindus indica</i> dsb	Pemkot Kota Surakarta	Belum terlaksana, menunggu Perda RPPLH dan Perda PPLH

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



4	Kluster Pengelolaan Limbah	PSEL	PSEL Putri Cempo akan mengurangi tumpukan sampah ( <i>open dumping</i> ) yang potensial menghasilkan emisi metana serta resiko kebakaran pada musim kemarau	Pemerintah Kota Surakarta, PT. SCMPP	Terlaksana sudah beroperasi
		Pengelolaan Sampah dari Hulu	Pengelolaan sampah dari hulu bisa dilakukan melalui pelaksanaan pelatihan, workshop maupun penyediaan infrastruktur. Konsep pengelolaan adalah pemilahan sampah dan pemberian nilai tambah melalui konversi sampah menjadi produk bernilai ekonomis. Penambahan infrastruktur adalah pada penyediaan truk pengangkut yang sudah menyediakan fasilitas bak sampah yang terpilah.	Dinas Lingkungan Hidup	Terlaksana namun belum optimal
		Pasar Produk Daur Ulang	Penyediaan media informasi sekaligus jual beli digital untuk memudahkan pemasaran beranekaragam	Dinas Perdagangan	Belum terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			produk daur ulang Kota Surakarta		
	Yellow Troops		Penyediaan aplikasi yang dapat diunduh masyarakat sebagai media pelaporan pada kondisi pengelolaan sampah (misal laporan pembakaran sampah, laporan tumpukan sampah belum terangkut dll), sekaligus terhubung dengan pengepul, komunitas sekolah adiwiyata maupun pengelola lain untuk memudahkan pemerintah dalam pengawasan pengelolaan sampah	Dinas Lingkungan Hidup	Belum terlaksana
	Pemanfaatan Limbah		Penyediaan instalasi biogas terutama pada fasilitas publik maupun perumahan untuk memanfaatkan emisi dari sanitasi (septic tank)	DPUPR	Terlaksana

### C. Rekomendasi

Berdasarkan pada hasil inventarisasi GRK tahun 2022 dapat diajukan beberapa rekomendasi sebagai berikut.

No	Kluster kegiatan	Rekomendasi	Deskripsi kegiatan	Pelaksana Kegiatan
1	Penyelenggaraan Inventarisasi dan tata kelola Gas Rumah Kaca	Pembentukan satuan tugas khusus perubahan iklim	Satgassus berperan dalam penyamaan persepsi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Peran satgassus dapat dioptimalkan dalam pengumpulan dan penyeragaman data aktivitas inventarisasi GRK maupun informasi mitigasi yang telah dilakukan. Hal ini dirasa menjadi urgent mempertimbangkan kondisi perubahan iklim yang memburuk. Keselarasan juga diperlukan untuk mengimbangi pembangunan masif Kota Surakarta dan membentuk kapasitas adaptif masyarakat.	Pemkot Kota Surakarta
		<i>Sharing resources</i> antara stakeholder	Kegiatan FGD rutin yang melibatkan seluruh stakeholders lingkungan Kota Surakarta khusus membahas perubahan iklim. Kegiatan ini sekaligus untuk membagi informasi upaya mitigasi maupun peningkatan kapasitas adaptif	Pemkot Kota Surakarta, DLH Kota Surakarta

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



			terkait perubahan iklim. Data FGD dapat menjadi materi tambahan dalam	
		Kordinasi penyediaan data pada level lebih tinggi	Kordinasi ini dilakukan menanggapi kesulitan data pada level pengelola yang berada di luar wewenang pemerintah kota seperti data penggunaan energi Pertamina	DLH Kota Surakarta
		Penyediaan peta kerentanan Gas Rumah Kaca	Peta kerentanan GRK akan menunjukkan kawasan yang rentan terhadap produksi maupun dampak GRK sekaligus menjadi bagian/variabel peta kerentanan Perubahan Iklim. Penyusunan peta ini tentu membutuhkan Inventarisasi Emisi dengan pendekatan bottom up	DLH Kota Surakarta
		Penyusunan RAD GRK dan RAD Perubahan Iklim berdasarkan pada hasil Inventarisasi GRK 2023	Terdapat perubahan dalam inventarisasi GRK yang perlu untuk dimasukkan dalam RAD GRK maupun RAD Perubahan Iklim Kota Surakarta berikutnya. Perlu dipertimbangkan untuk menghilangkan GRK bangkitan listrik dari evaluasi dalam RAD berikutnya. Fokus perlu dilakukan untuk ragam GRK yang langsung dihasilkan di Kota Surakarta	Bappeda Kota Surakarta
		Pemasangan alat digital monitoring kualitas udara dan kondisi meteorologi	Kota Surakarta telah memiliki satu alat pemantau dan dirasa perlu menambah agar titik pantau real time menjadi lebih beragam.	DLH Kota Surakarta dan Akademisi
		Penyeragaman data aktivitas sub sektoral	Perlu penyeragaman pada data aktivitas yang dikoleksi untuk menghitung beban emisi tahunan	Seluruh stakeholders sumber data



**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



2	Penggunaan Energi	Penambahan infrastruktur pendukung pada setiap bangkitan lalu lintas baru	Penambahan infrastruktur terkait dengan pembangunan 17 titik prioritas yang potensial menjadi daya tarik baru wisatawan. Hal ini berarti dapat menjadi pusat kepadatan lalu lintas baru, memiliki kerentanan tinggi terhadap kenaikan GRK	Pemkot Surakarta
		Penyusunan rencana mitigasi transportasi	Dokumen perencanaan transportasi dengan pelibatan seluruh pemerintah daerah dalam lingkup Subosukawonosraten. Hal ini terkait dengan status komuter sebagai kontributor utama GRK Kota Surakarta	Pemkot Surakarta
		Evaluasi pelaksanaan CFD	CFD saat ini dianggap melenceng dari tujuan awal dan menimbulkan problematika lingkungan baru termasuk terkait potensi GRK	Pemkot Surakarta, DLH Kota Surakarta dan Dishub Kota Surakarta
		Optimalisasi penggunaan transportasi publik	Kota Surakarta telah memiliki sistem transportasi publik yang baik dengan adanya BST, BRT dan feeder. Namun, peran serta masyarakat belum optimal dalam penggunaan moda publik. Perlu dilakukan kerjasama dengan instansi pemerintah, kantor swasta maupun institusi pendidikan (termasuk kampus) untuk mengalihkan penggunaan moda. Salah satu usulan adalah mengadakan hari transportasi publik	Pemkot Surakarta, Dishub Kota Surakarta

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



		Kajian dinamika GRK dalam penyelenggaraan event	Event menjadi bagian upaya pencapaian Kota MICE dan wahana kebangkitan ekonomi. Meskipun demikian, perlu dilakukan kajian terutama karena event akan mendatangkan banyak penduduk temporer (wisatawan). Kondisi tersebut potensial menambah beban GRK terutama penggunaan energi.	DLH Kota Surakarta, Dishub Kota Surakarta
		Kordinasi koleksi data bahan bakar industri	Data aktivitas terkait konsumsi bahan bakar industri masih terbatas, termasuk pada industri penciri seperti batik	DiskopUMKM, Dinas Perindustrian dan Perdagangan
3	Industrial process dan product use (IPPU)	Kordinasi koleksi data aktivitas IPPU	Data aktivitas IPPU masih terbatas terutama penggunaan pelumas dan wax/parafin pada industri	DiskopUMKM, Dinas Perindustrian dan Perdagangan
4	Agricultural, Forestry and Landuse	Urban Farming	Urban farming dapat menjadi bagian upaya peningkatan kapasitas adaptif	Dinas Peternakan, Pertanian dan Ketahanan Pangan
		Regulasi perlindungan pohon	Regulasi ini terutama untuk melindungi jenis jenis pohon yang telah tumbuh dan berkembang baik di perkotaan dari penebangan. Regulasi juga akan lebih terarah melindungi jenis yang mempunyai fungsi ekologis penting seperti <i>Ficus benjamina</i> , <i>Pithecelobium dulce</i> , <i>Tamarindus indica</i> dsb	Pemkot Surakarta
5	Pengelolaan Limbah	Pembaruan data sampah (komposisi dan perlakuan di masyarakat)	Komposisi sampah saat ini masih menggunakan data lampau sehingga dikhawatirkan dapat mempengaruhi hasil perhitungan	DLH Kota Surakarta

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA  
KOTA SURAKARTA 2023  
LAPORAN AKHIR**



		Penyediaan data jumlah sampah terproses dalam PSEL	Hal ini terkait dengan telah beroperasinya PSEL Putri Cempo. Data penggunaan tersebut akan digunakan untuk mereduksi data aktivitas tumpukan sampah tahunan	PT SCMPP
		Foodwaste management	Limbah makanan menjadi salah satu sumber limbah terbesar yang tidak seluruhnya dapat terangkut ke TPA. Perlu pengembangan alternatif pengelolaan seperti kampanye pemanfaatan kembali, produksi ekoenzym, pupuk organik hingga budidaya maggot. Basis pemanfaatan harus dengan pendekatan ekonomi sirkuler	DLH Kota Surakarta, Disnaktan dan Ketahanan Pangan

## BAB VIII PENUTUP

Selaras dengan tujuan pelaksanaan inventarisasi GRK Kota Surakarta tahun 2023, maka kesimpulan dari kegiatan ini antara lain adalah :

1. Sumber emisi di Kota Surakarta dibagi berdasarkan kategori utama IPCC adalah : Kluster penggunaan energi meliputi (a) transportasi meliputi (i) jalan raya (ii) kereta api, (b) industri, (c) domestik, dan (d) konsumsi listrik; Kluster proses industri dan penggunaan produk (IPPU) meliputi : (a) penggunaan pelumas industri (b) penggunaan waxes paraffin industri (c) penggunaan pelumas otomotif; Kluster pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan meliputi : (a) peternakan meliputi (i) fermentasi enterik (ii) pengolahan kotoran, dan (b) penggunaan lahan; Kluster pengelolaan limbah meliputi (a) landfill sampah, (b) sanitasi domestik dan (c) pembakaran sampah
2. Beban emisi GRK Kota Surakarta pada tahun 2023 berdasarkan kategori utama dan parameter diinventarisasi adalah
  - a. Penggunaan energi menghasilkan emisi 1352655,58 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun
  - b. Proses industri dan penggunaan produk (IPPU) menghasilkan emisi 9828,28 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun
  - c. Pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan (AFOLU) menghasilkan emisi 60207,24 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun
  - d. Pengelolaan limbah menghasilkan emisi 173466,72 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun
3. Secara keseluruhan untuk Kota Surakarta pada inventarisasi tahun 2023 mengemisikan 159157,83 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun terkesan menurun dibandingkan inventarisasi tahun 2022 karena koreksi emisi bangkitan listrik

4. Nilai ideal evaluasi perubahan GRK adalah dengan eliminasi bangkitan listrik yang menghasilkan angka 714204,86 tonCO<sub>2</sub>eq/tahun meningkat 9,54% dibandingkan tahun 2022
5. Kategori kunci pada emisi GRK Kota Surakarta untuk parameter karbondioksida adalah penggunaan energi, untuk parameter metana adalah pengelolaan limbah dan untuk parameter nitrogen dioksida adalah pengelolaan limbah dan penggunaan energi
6. Rekomendasi kegiatan inventarisasi tahun 2022 adalah optimalisasi peran serta masyarakat dalam program transportasi publik, perencanaan transportasi dalam konteks Subosukawonosraten, kajian GRK pelaksanaan event, urgensi pemantauan ambient dan meteorologi real time, pelengkapan dan pembaruan data aktivitas serta pembentukan satuan tugas khusus perubahan iklim.
7. Surakarta harus terfokus dalam mitigasi kategori kunci dan menguatkan kapasitas adaptif masyarakat

## DAFTAR PUSTAKA

- Alyuz, U and Alp, K., 2014, Emission Inventory of Primary Air Pollutants in 2010 from Industrial Processes in Turkey, *Science of The Total Environment* 488-489 : 369-381. [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv). (diakses 15 November 2016).
- Anderson, T.R., Hawkins, E., and Jones, P.D. 2016. CO<sub>2</sub> the greenhouse effect and global warming : from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's earth system models. *Endeavour* 40 (3) : 178-187
- Badan Pusat Statistik Daerah Surakarta. 2019. *Surakarta Dalam Angka 2017*. Surakarta : BPSD Surakarta
- Das, S. and N. Mangwani. 2015. Ocean acidification and marine microorganisms : responses and consequences. *Oceanologia* 57 (2015) : 349-361
- Gioli, B., Gualtieri, G., Busillo, C., Calastrini, F., Zaldei, A., and P. Toscano. 2015. Improving high resolution emission inventories with local proxies and urban eddy covariance flux measurement. *Atmospheric Environment* 115 : 246-256.
- Gulia, S., Nagendra, S.M.S., Khare, M., and I. Khanna. 2014. Urban Air Quality Management : A Review. *Atmospheric Pollution Research* 6 (2015) : 286-304
- Henderson, R.M., Reinert, S.A., Dekhtyar, P. and Migdal, A. 2018. *Climate Change in 2018 : Implications in Business*. Harvard Business School Publishing. Boston.
- Hill, M.K. 2004. *Understanding Environmental Pollution*. Second Edition. Cambridge-UK : Cambridge University Press
- Himawan, W., Sajidan, Sunarto, Setyono, P. and Nancy, N. 2022. A pattern changes evaluation on household greenhouses gases during pandemic in Surakarta. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1180 (2023) 012006
- Himawan, W. 2023. Mitigasi Emisi karbondioksida Sektor Transportasi Perkotaan Melalui Sistem Dinamis. *Disertasi*. Sekolah Pascasarjana Universitas Sebelas Maret Surakarta
- Ihsan, F. and Rosleine, D. 2019. Cooling effect to mitigate Urban Heat Island by *Pterocarpus indicus*, *Swietenia macrophylla* and *Samanea saman* In Bandung, West Java Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 528 (2020) 012057
- IPCC. 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Japan : Institute for The Global Environmental Strategies
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2012. *Glossary of terms*. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance

- Climate Change Adaptation [Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.K., Allen, S.K., Tignor, M., and Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge and New York
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. *Climate Change 2014 : Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to The Fifth Assessment Report of The IPCC (Core Writing Team, R.K Pachauri and L.A Meyer (eds.)). IPCC. Geneva.
- IPCC. 2013. *Report on Climate Change 2013*. Greenfacts. [www.greenfacts.org](http://www.greenfacts.org)
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2011. *Pedoman Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*. Jakarta : Kementerian Lingkungan Hidup
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2012. *Status Lingkungan Hidup Indonesia 2011*, Pilar Lingkungan Hidup Indonesia
- Keraf, S. 2002. *Etika Lingkungan*. Jakarta : Penerbit Kompas Gramedia
- Lin, B-S. and Lin Y-J. 2010. Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park. *HortScience* 45 (1) : 83-86
- McGregor, J.L., Nguyen, K.C., Kirono, D.C.C., and Katzfey, J.J. 2015. High-resolution climate projections for the islands of Lombok and Sumbawa, Nusa Tenggara Barat Province, Indonesia : Challenges and implications. *Climate Risk Management* 12 (2016) : 32-44
- Nancy, N. 2022. Determinasi Emisi Transportasi dan Tutupan Vegetasi Terhadap Fenomena *Urban Heat Island* Pada *Central Business District* Kota Surakarta. Draft Skripsi. Program Studi S1 Ilmu Lingkungan FMIPA Universitas Sebelas Maret Surakarta
- Nancy, N dan Himawan, W. 2022. Preferensi Moda Transportasi Komuter sebagai Problematika Gas Rumah Kaca Kluster Energi serta Industrial Product and Product Use (IPPU) Sumber Bergerak Kota Surakarta. Draft Artikel Jurnal
- Naturezza, D. 2009. Analisis Kenaikan Muka Air Laut Berbasis Sistem Informasi Geografis Menggunakan Satelit Altimetri. *Skripsi*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., and Yuan, C. 2011. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong
- Peraturan Pemerintah Nomor 22 tahun 2021 tentang "Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup"
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2011 tentang *Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca*

- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 71 Tahun 2011 tentang *Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang *Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara*
- Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 2 Tahun 2006 tentang *Pengelolaan Lingkungan Hidup*
- Popescu, F. and Ionel, I. 2010. *Anthropogenic Air Pollution Sources. Air Quality* (Edited by Ashok Kumar). Intechopen Europe. Rijeka : Sciyo
- Ramanathan, V. and Feng, Y. 2009. Air pollution, Greenhouse Gases and Climate Change : Global and Regional Perspectives. *Atmospheric Environment* 43 (2009) pp 37-50. Elsevier Ltd
- Setyono, P., Pranoto, Purnawan, C., Himawan, W., Mawahib, S.H., Rahman, K., and Arsianti, A. 2014. *Final Report Emission Inventory for City of Surakarta*. Jakarta, Indonesia : Ministry of Environmental-GIZ.
- Setyono, P., Himawan, W., dan N. Nancy. 2020. Estimasi Emisi Partikulat (PM<sub>10</sub>) Akibat Ragam Aktivitas Urban di Kota Surakarta. *Jurnal Ilmu Lingkungan Volume* (18) : 556-564
- Shahbazi, H., Taghvaei, S., Hosseini, V., and H. Afhsin. 2016. A GIS based emission inventory development for Tehran. *Urban Climate* 17 (2016) : 216-229.
- Shuai, C., Liyin, S., Jiao, L., Wu, Y., and Tan, Y. 2017. Identifying key impact factors on carbon emission: Evidences on panel and time series data of 125 countries from 1999-2011. *Applied Energy* 187 (2017): 310-325.
- Suhadi, D.R., Febrina, A.S., Setyono, P., Himawan, W., Pramadhony, Mahalana, A., Zakaria, M., Krisnawaty, L., Tambun, J.H., Harsono, Rena, T., Darajat, R., dan R.M. Rumapea. 2013. *Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemaran Udara di Perkotaan*. Jakarta : Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia
- Sunarto, Wiryanto and W. Himawan. 2016. The estimation of emission from the gateways to Surakarta City, Indonesian using the software of Mobilev 3.0 as the basis for an action plan of emission control. *Nusantara Bioscience* 8 (2)
- Sunarto, Irfan, Indrawan, M. Mahadjoeno, E., Himawan, W., Nancy, N., Sholiqin, M., Javarendra, R.A., Berlin, G.E. dan Ramadhani, D.D. 2022. Kajian keanekaragaman, thermal humidity index (THI) dan pencemaran udara pada pengembangan kawasan wisata budaya dan pusat jasa perdagangan Kota Surakarta (Cluster Sriwedari Gladag). Draft Artikel Jurnal.



- Tukiran, J.M., Ariffin, J., and Ghani, A.N.A. 2016. Cooling effects of two types of tree canopy shape in Penang, Malaysia. *International Journal of GEOMATE*, Aug., 2016, Vol. 11, Issue 24, pp. 2275-2283
- Undang Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang *Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*
- Undang Undang Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2007 tentang Mitigasi
- World Meteorological Organization. 2020. *WMO Statement on the State of the Global Climate Change in 2019*. Publication Board of WMO. Geneva.
- Wujeska-Klaue, A and Pfautsch, S. 2020. The Best Urban Trees for Daytime Cooling Leave Nights Slightly Warmer. *Forests* 2020, 11, 945; doi:10.3390/f11090945
- Yu, Q., Ji, W., Pu, R., Landry, S., Acheampong, M., O'Neill-Dunne, J., Ren, Z. and Tanim, S.H. 2020. A preliminary exploration of the cooling effect of tree shade in urban landscapes. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 92 (2020) 102161
- Zikra, M., Suntoro and Lukijanto. 2015. Climate change impacts on Indonesia coastal areas. 2nd International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environment and Natural Disaster Management, ISOCEEN 2014. *Procedia Earth and Planetary Science* 14 ( 2015 ) 57 – 63



**DINAS LINGKUNGAN HIDUP  
KOTA SURAKARTA  
TAHUN 2023**

