



DINAS LINGKUNGAN HIDUP
KOTA SURAKARTA
TAHUN 2022

LAPORAN AKHIR

INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA
TAHUN 2022



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. Hal ini juga berkaitan erat dengan komitmen pemerintah untuk menurunkan emisi GRK sebagai bagian dari ratifikasi *Paris Agreement*.

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 2022 secara khusus akan menunjukkan rebound effect pasca pembatasan aktivitas pandemi terhadap kondisi GRK di Kota Surakarta. 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 Citra Gama Sakti 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
BAB I PENDAHULUAN	1
A Latar Belakang	1
B Gas Rumah Kaca dan Dampak Lingkungan	4
C Respon Pemerintah dalam Mitigasi Gas Rumah Kaca	6
D Gambaran kualitas udara Kota Surakarta berbasis Indeks (IKU)	10
E Masalah gas rumah kaca di Kota Surakarta	13
F Tujuan Kegiatan	15
G Manfaat Kegiatan	15
BAB II METODOLOGI	17
A Kelembagaan dalam Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca	17
B Ruang Lingkup Kegiatan	18
1. Cakupan Spasial	18
2. Cakupan Temporal	19
3. Cakupan Metode Kajian	19
C Persiapan Inventarisasi Gas Rumah Kaca	19
D Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca	23
E Analisis Kategori Kunci (Key Categories)	39
F Analisis emisi transportasi gateways Surakarta	41
G Analisis dan Interpretasi Hasil	42
BAB III HASIL INVENTARISASI	44
A Tingkat, Status dan Kecenderungan Emisi Gas Rumah Kaca	44
1. Review Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Tahun 2021	46
2. Hasil Inventarisasi Gas Rumah Kaca tahun 2021	49
a. General Review	49
b. Kluster Pengadaan dan Penggunaan Energi	51
(1) Sektor : Transportasi	57
(2) Sektor : Domestik	72
(3) Sektor : Emisi Bangkitan Listrik	77
(4) Sektor : Industri	82
c. Kluster Industrial Process dan Product Use (IPPU)	87
(1) Sektor : Konsumsi Pelumas Industri	89
(2) Sektor : Konsumsi Paraffin Waxes Industri Batik	91
(3) Sektor : Pelumas Automotive	92
d. Kluster Agrikultur, Kehutanan dan Penggunaan Lahan (AFOLU)	95
(1) Sektor : Peternakan	98
(2) Sektor : Pertanian	104
(3) Sektor : Penggunaan Lahan	114
e. Kluster Pengolahan Limbah	119
(1) Sektor : Landfill Sampah	122
(2) Sektor : Pembakaran Sampah	126
(3) Sektor : Sanitasi Domestik	128

BAB IV	ANALISIS KETIDAKPASTIAN DAN KATEGORI KUNCI	134
A	Analisis Ketidakpastian	134
B	Kategori Kunci	136
BAB V	PENGENDALIAN DAN PENJAMINAN MUTU	143
BAB VI	RENCANA PERBAIKAN PENYELENGGARAAN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA	147
A	Perbaikan Koordinasi Data Lokal	147
B	Perbaikan Metode Koleksi Data	149
C	Peningkatan Metode Perhitungan dan Analisis Data	150
D	Perbaikan Quality Assesment (QA)	151
E	Konsistensi dan Kontinuitas	151
F	Evaluasi Diri	152
BAB VII	EVALUASI DAN REKOMENDASI RENCANA AKSI MITIGASI GAS RUMAH KACA	153
A	Evaluasi Rencana Aksi Mitigasi	153
B	Rekomendasi	166
BAB VIII	PENUTUP	175
	DAFTAR PUSTAKA	177

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Sumber emisi&distribusi data Kota Surakarta	20
Tabel 2	Jenis gas rumah kaca dan informasi terkait	21
Tabel 3	Nilai GWP pada <i>Second Assessment Report (2nd AR of IPCC)</i>	27
Tabel 4	Revisi Faktor Skala Jenis Tanah Berbeda di Indonesia	35
Tabel 5	Faktor skala yang disesuaikan dengan ekosistem padi dan tata air di Indonesia	36
Tabel 6	Faktor Skala untuk varietas padi yang berbeda di Indonesia	36
Tabel 7	Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC	46
Tabel 8	Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC tahun inventarisasi 2022	49
Tabel 9	Hasil inventarisasi GRK kluster pengadaan dan penggunaan energi Kota Surakarta tahun 2022	55
Tabel 10	<i>Net calorific value (NCV) dan faktor emisi aktivitas transportasi</i>	60
Tabel 11	Hasil Inventarisasi GRK Sektor Transportasi Tahun 2022	60
Tabel 12	Informasi umum gateways Kota Surakarta	65
Tabel 13	Konsumsi bahan bakar domestik Kota Surakarta 2022	74
Tabel 14	Net calorific value (NCV) dan faktor emisi aktivitas domestik	74
Tabel 15	Emisi aktivitas domestik Kota Surakarta tahun 2022	75
Tabel 16	Konsumsi listrik berdasarkan kelompok konsumen tahun 2022	78
Tabel 17	Emisi bangkitan listrik Kota Surakarta tahun 2022	78
Tabel 18	Konsumsi bahan bakar sektor industri Kota Surakarta 2020	83
Tabel 19	Net calorific value (NCV) dan faktor emisi aktivitas industri	83
Tabel 20	Emisi aktivitas industri Kota Surakarta tahun 2022	84
Tabel 21	Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori IPPU	89
Tabel 22	Data aktivitas konsumsi pelumas industri Kota Surakarta berdasarkan kelompok industri	89
Tabel 23	Faktor konversi, net calorific value dan konstanta hitung emisi pelumas	90
Tabel 24	Estimasi emisi penggunaan pelumas industri Kota Surakarta tahun 2022	90
Tabel 25	Faktor konversi, net calorific value dan konstanta hitung emisi parafin/wax	91

Tabel 26	Estimasi emisi penggunaan parafin/wax industri batik Kota Surakarta tahun 2022	91
Tabel 27	Faktor emisi penggunaan pelumas kendaraan	92
Tabel 28	Hasil perhitungan GRK pelumas kendaraan bermotor Kota Surakarta tahun 2022	93
Tabel 29	Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori agrikultur, kehutanan dan penggunaan lahan	96
Tabel 30	Data aktivitas peternakan di Kota Surakarta	99
Tabel 31	Faktor emisi metana dari fermentasi enterik dan pengolahan kotoran pada sektor peternakan	101
Tabel 32	Faktor emisi nitrogen dioksida dari emisi langsung pengolahan kotoran pada sektor peternakan	102
Tabel 33	Faktor emisi nitrogen dioksida dari emisi tidak langsung pengolahan kotoran pada sektor peternakan	102
Tabel 34	Hasil inventarisasi gas rumah kaca sektor peternakan	103
Tabel 35	Estimasi emisi sektor pertanian di Kota Surakarta tahun 2022	105
Tabel 36	Estimasi emisi pemakaian pupuk urea pada lahan pertanian	107
Tabel 37	Data aktivitas emisi pengolahan tanah di Kota Surakarta	108
Tabel 38	Faktor emisi yang digunakan untuk menghitung beban emisi NO ₂ langsung dan NO ₂ tidak langsung dari aktivitas pengolahan tanah.	109
Tabel 39	Hasil perhitungan beban emisi aktivitas pertanian, sub aktivitas pengolahan tanah di Kota Surakarta	110
Tabel 40	Data aktivitas pertanian Kota Surakarta	111
Tabel 41	Koefisien pendukung perhitungan beban emisi aktivitas pengolahan sawah	112
Tabel 42	Faktor emisi pengolahan sawah yang telah dikoreksi	113
Tabel 43	Hasil perhitungan beban emisi aktivitas pertanian, sub aktivitas pengolahan sawah di Kota Surakarta	114
Tabel 44	Penggunaan lahan Kota Surakarta periode 2011-2018	116
Tabel 45	Estimasi serapan karbon dan emisi penggunaan lahan Kota Surakarta	117
Tabel 46	Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori pengolahan limbah	120
Tabel 47	Timbulan sampah Kota Surakarta periode 2007-2020	124
Tabel 48	Komposisi timbulan sampah Kota Surakarta	125
Tabel 49	Estimasi emisi metana landfill sampah di Kota Surakarta tahun 2020	126
Tabel 50	Faktor oksidasi dan faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan beban emisi pembakaran sampah	127
Tabel 51	Profil C pada material sampah terbakar	127
Tabel 52	Beban emisi aktivitas pembakaran sampah Kota Surakarta	128
Tabel 53	Data aktivitas sektor sanitasi domestik Kota Surakarta	130

Tabel 54	Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi CH ₄ (metana) sanitasi domestik	131
Tabel 55	Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi N ₂ O (nitrogen oksida) sanitasi domestik	132
Tabel 56	Estimasi emisi sektor sanitasi domestik Kota Surakarta tahun 2021	132
Tabel 57	Prosedur umum rencana pengendalian mutu (QC) inventarisasi GRK Kota Surakarta	145
Tabel 58	Evaluasi rencana aksi mitigasi gas rumah kaca Kota Surakarta 2021	157

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Komparasi nilai SO ₂ dan NO ₂ pada empat peruntukkan kegiatan di Kota Surakarta tahun 2021	11
Gambar 2	Nilai indeks kualitas udara berdasarkan peruntukkan kawasan di Kota Surakarta pada tahun 2021	12
Gambar 3	Siklus pengendalian kualitas udara daerah	13
Gambar 4	Struktur dan hierarki kelembagaan penyusunan dokumen Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kota Surakarta tahun 2022	17
Gambar 5	Peta administratif Kota Surakarta	18
Gambar 6	Skema preparasi inventarisasi GRK Kota Surakarta	23
Gambar 7	Tren GRK Kota Surakarta pada 2018-2021	47
Gambar 8	Dinamika komposisi kontribusi GRK pada setiap kluster di inventarisasi 2021	48
Gambar 9	Kontribusi kluster GRK pada inventarisasi Kota Surakarta tahun 2022	50
Gambar 10	Dinamika gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta pada periode inventarisasi 2018-2022	51
Gambar 11	Komparasi kontribusi emisi kluster pengadaan dan penggunaan energi dengan bangkitan konsumsi listrik	56
Gambar 12	Komparasi kontribusi emisi kluster pengadaan dan penggunaan energi dengan bangkitan konsumsi listrik	57
Gambar 13	Dinamika konsumsi bahan bakar transportasi Kota Surakarta pada periode 2016-2020	59
Gambar 14	Dinamika gas rumah kaca (GRK) transportasi on road Kota Surakarta periode 2012-2021	61
Gambar 15	Jumlah kendaraan bermotor teregistrasi di Kota Surakarta	63
Gambar 16	Komposisi jenis kendaraan Kota Surakarta	63
Gambar 17	Simulasi GRK tahunan pada jalur gateways Surakarta (tidak menggunakan pendekatan panjang jalan tertentu)	64

Gambar 18	Simulasi GRK tahunan berdasarkan panjang ruas jalan sebagai akses masuk Kota Surakarta	65
Gambar 19	Emisi bulanan gateways Kota Surakarta pada Agustus 2022 berdasarkan jenis kendaraan	66
Gambar 20	Kontribusi GRK jenis kendaraan pada gateways Kota Surakarta dengan pendekatan emisi rata-rata/hari	67
Gambar 21	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	70
Gambar 22	Komposisi konsumsi bahan bakar rumah tangga Kota Surakarta tahun 2021	73
Gambar 23	Dinamika GRK konsumsi LPG domestik Kota Surakarta tahun 2016-2021	76
Gambar 24	Dinamika GRK konsumsi kayu bakar domestik Kota Surakarta tahun 2019-2021	76
Gambar 25	Dinamika komposisi GRK bangkitan listrik Kota Surakarta pada tahun 2020 dan 2021	79
Gambar 26	Dinamika komposisi GRK bangkitan listrik Kota Surakarta pada tahun 2013 dan 2021	80
Gambar 27	Dinamika emisi GRK konsumsi energi sektor industri pada periode 2016-2021 di Kota Surakarta	85
Gambar 28	Kontribusi GRK industri berdasarkan jenis bahan bakar	86
Gambar 29	Penjelasan pengelompokkan emisi GRK pada proses industri menurut kategori kunci IPCC	88
Gambar 30	Kontribusi GRK pelumas berdasarkan jenis kendaraan	93
Gambar 31	Komposisi GRK pelumas kendaraan pada weekdays dan weekend di Kota Surakarta	94
Gambar 32	Komposisi kontribusi GRK AFOLU Kota Surakarta hasil inventarisasi tahun 2022	97
Gambar 33	Komposisi jenis ternak Kota Surakarta tahun 2022	100
Gambar 34	Dinamika lahan terbangun Kota Surakarta 2011-2018	116
Gambar 35	Temperatur rata rata Kota Surakarta pada tahun 2021	118
Gambar 36	Komposisi kontribusi GRK kluster Pengolahan Limbah Kota Surakarta hasil inventarisasi tahun 2022	121
Gambar 37	Produksi sampah Kota Surakarta 2016-2021	122
Gambar 38	Data pengelolaan sampah di Kota Surakarta tahun 2021	123
Gambar 39	Dinamika nilai GRK landfill Putri Cempo 2008-2022	126
Gambar 40	Struktur generik analisis ketidakpastian	135
Gambar 41	Mekanisme QA/QC internal dan eksternal	144

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Faktor pemicu masalah emisi gas rumah kaca (GRK) adalah populasi manusia dan pemenuhan kebutuhan. Pertambahan populasi memiliki hubungan imbal balik dengan kebutuhan dan memicu modernisasi teknologi untuk pemenuhan secara massal. Titik tersebut memunculkan aktivitas manusia sebagai kontributor utama GRK era industri (Shuai et al, 2017). Korelasi positif dan ketergantungan setiap aktivitas manusia pada energi fosil mendorong peningkatan signifikan GRK pasca revolusi industri (Alyuz and Alp, 2014; Henderson et al, 2018). Ragam aktivitas, pola konsumsi dan gaya hidup memperburuk umpan balik manusia terhadap masalah GRK (Anderson et al, 2016).

Riset Henderson et al (2018) menunjukkan mayoritas penduduk bumi menyepakati perubahan iklim sebagai masalah bagi peradaban modern dengan lebih dari 54% warga dari 40 negara responden memandang serius. Kesadaran masyarakat dunia dipicu oleh luasan dan durasi dampak perubahan iklim sebagai dampak GRK terhadap kehidupan bumi. Kenaikan temperatur secara signifikan seiring dengan peningkatan GRK atmosfer mengakibatkan berbagai kerusakan lingkungan. Data *World Meteorological Organization* (WMO) mencatat periode 2014-2019 sebagai peningkatan temperatur tertinggi permukaan bumi.

Bumi mengalami perubahan akibat perubahan iklim. Beberapa habitat hilang sebagai dampak perubahan iklim, kenaikan permukaan laut dan bencana hidrometeorologis. Kondisi tersebut berdampak pada kehilangan biodiversitas maupun beragam fungsi dan jasa ekosistem. 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*.

Emisi merupakan produk wajar dari 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 menjadi sebuah dilema akibat ketergantungan aktivitas manusia terutama jenis 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.

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 CO₂ 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 2021 menunjukkan GRK penggunaan energi mencapai 93% (setara dengan 2871388,66 tonCO₂e/tahun). Transportasi jalan raya menjadi kontributor utama emisi GRK penggunaan energi Kota Surakarta dengan komposisi mencapai 71% (setara dengan 289745 CO₂e/tahun). Nilai tersebut mengalami peningkatan terhadap tahun sebelumnya.

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 menyasar 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 CO₂eq 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 29% 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.

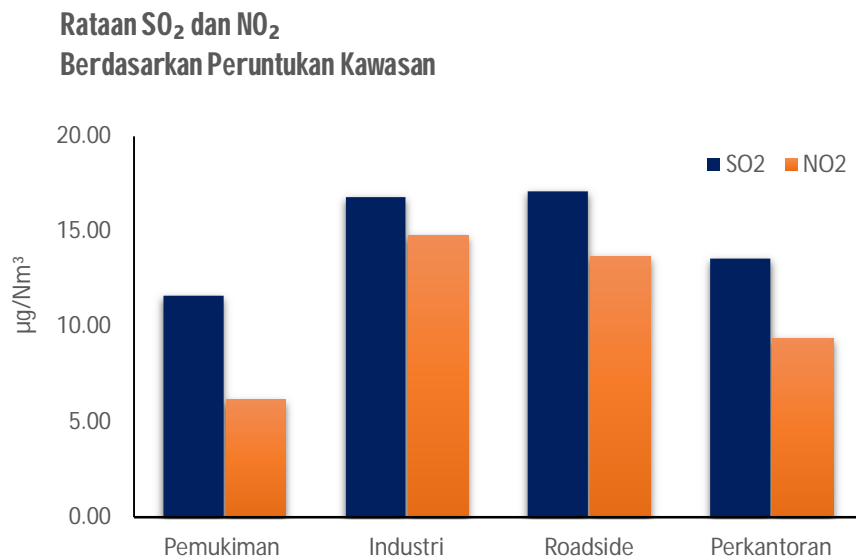
D. Gambaran kualitas udara Kota Surakarta berbasis Indeks (IKU)

Nilai IKU berdasarkan data verifikasi KLHK adalah 83,06. Nilai tersebut mengindikasikan kualitas udara dalam kondisi baik di Kota Surakarta. Nilai ini diperoleh dengan hanya memanfaatkan pantauan 8 titik yang telah mewakili 4 peruntukan.

Hasil perhitungan IKU yang mengindikasikan kondisi kualitas udara baik menjadi sebuah pertanda positif. Hal ini mempertimbangkan pada kondisi emisi Kota Surakarta dan mitigasi natural (vegetasi) yang sesungguhnya memiliki tren kurang baik. Tren emisi cenderung terus meningkat dengan kontribusi terbesar dari transportasi jalan raya. Pada sisi berbeda, Kota Surakarta kehilangan mitigasi natural dengan penurunan jumlah vegetasi serta keterbatasan pengembangan ruang terbuka hijau (RTH). Nilai IKU menunjukkan bahwa Pemerintah Kota Surakarta masih memiliki kesempatan untuk merencanakan langkah mitigasi dan adaptasi dalam rangka perlindungan dan pengelolaan kualitas udara. Penerapan skala kategori kunci dapat dilakukan untuk perbaikan kualitas udara pada kelompok aktivitas dengan nilai indeks terburuk.

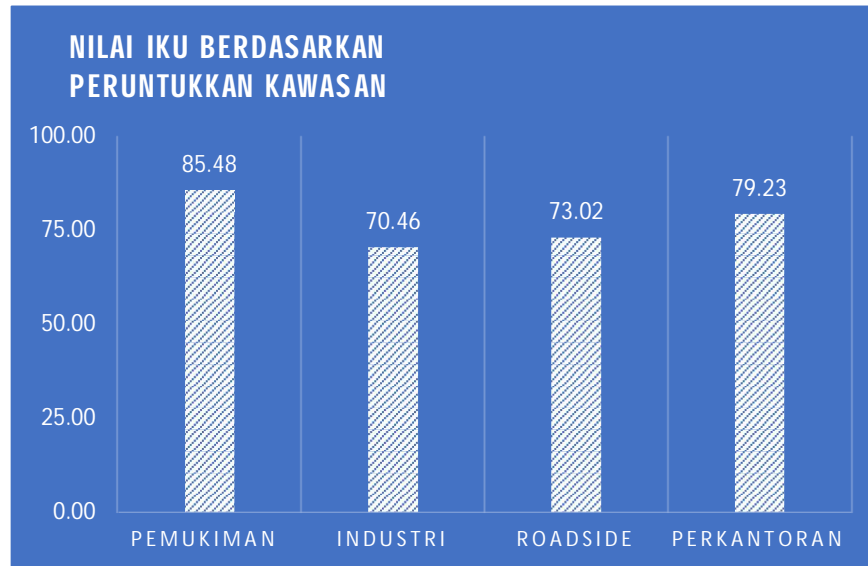
Hasil komparasi secara spasial menunjukkan nilai tertinggi untuk SO₂ diperoleh di kawasan roadside dan industri. Nilai SO₂ muncul lebih tinggi dibandingkan NO₂ pada seluruh kawasan. Kondisi ini diasumsikan disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor utama karena situasional tahun 2021 yang masih dalam kondisi pandemi Covid-19. Pembatasan mobilitas dan protokol kesehatan ketat menyebabkan penurunan penggunaan transportasi. Faktor kedua adalah kondisi lingkungan yang membawa emisi industri masuk ke Kota Surakarta. Pandemi membatasi transportasi namun

tidak berpengaruh signifikan pada industri. Hasil uji ambien parameter SO₂ menunjukkan resiko dampak kolateral dari emisi tersebut.



Gambar 1. Komparasi nilai SO₂ dan NO₂ pada empat peruntukkan kegiatan di Kota Surakarta tahun 2021 (Sumber : pengolahan data DLH Surakarta, 2022)

Pemukiman memiliki nilai terendah untuk parameter NO₂ maupun SO₂. Hal ini merupakan indikator yang ideal mempertimbangkan resiko lebih tinggi pencemaran pada kawasan dengan populasi padat. Emisi NO₂ dan SO₂ 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 NO₂ tertinggi didapat di kawasan industri dan roadside mengindikasikan arus lalu lintas yang tetap padat di kawasan tersebut berkombinasi dengan penggunaan bahan bakar dalam proses industri.



Gambar 2. Nilai indeks kualitas udara berdasarkan peruntukkan kawasan di Kota Surakarta pada tahun 2021

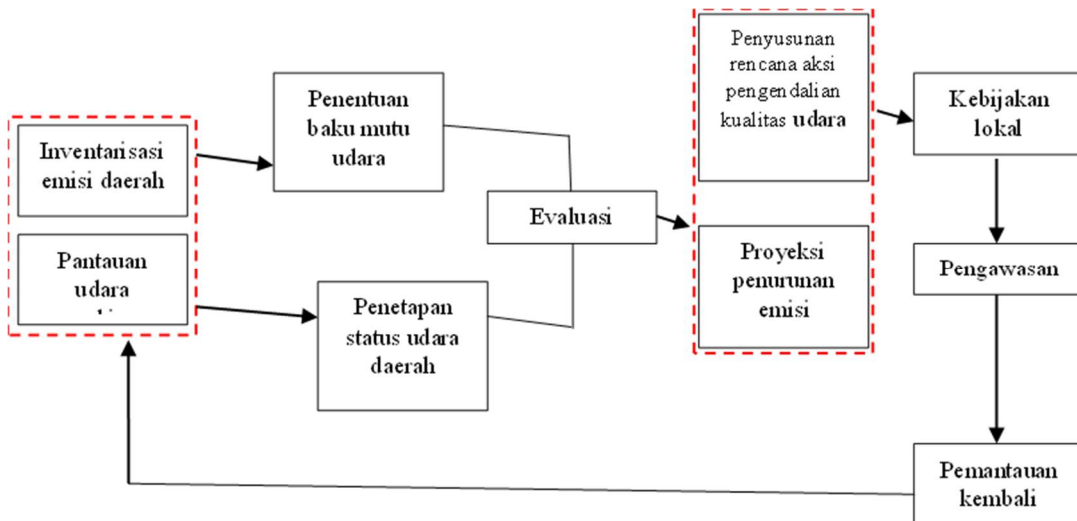
Konversi hasil evaluasi SO_x dan NO_x sebagai IKU menunjukkan nilai terbaik kualitas udara ditemukan pada kawasan pemukiman (85,48) dan perkantoran (79,23). Nilai terburuk diperoleh pada kawasan industri. Secara umum seluruh kawasan masih mengindikasikan kondisi yang baik meski perlu diberikan prioritas pengelolaan pada kawasan industri.

Komparasi temporal menunjukkan pengaruh musim pada emisi ambient meski tidak terlampau berbeda signifikan. Hujan (pada pengambilan bulan Agustus) menyebabkan nilai emisi untuk variabel gas NO₂ maupun SO₂ menjadi lebih rendah. Perbedaan belum signifikan karena bulan tersebut masih menjadi awalan penghujan dengan frekwensi maupun intensitas hujan belum terlampau tinggi.

Variabel NO₂ memiliki tren penurunan lebih kentara akibat penghujan. Rataan nilai emisi ambient NO₂ menurun dari 11,43 µg/Nm³ pada sampling Maret-April (Juni pada beberapa lokasi) menjadi 10,18 µg/Nm³ pada sampling Agustus. Hal ini dipengaruhi oleh penurunan temperatur maupun partikel yang dapat terbawa ke atmosfer. Penurunan nilai lebih umum ditemukan pada banyak lokasi, terutama ketika transportasi menjadi sumber emisi dominan.

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 km², 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 3. 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 tonCO₂/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 CO₂e/tahun. Emisi tersebut terutama dikontribusikan oleh kategori konsumsi energi, secara khusus pada transportasi jalan raya.

Tren kontributor emisi CO₂ 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). Kondisi emisi Surakarta diperburuk dengan indeks tutupan vegetasi yang rendah di Surakarta (skor 30,22), luas ruang terbuka hijau publik terbatas pada 7,98% kawasan atau setara dengan 372,97 ha (Pemerintah Kota Surakarta, 2022), dengan asumsi bahwa keberadaan vegetasi memiliki kemampuan alami untuk menyerap karbon.

Inventarisasi GRK pada 2021 menunjukkan GRK penggunaan energi mencapai 93% (setara dengan 2871388,66 tonCO₂e/tahun). Transportasi jalan raya menjadi kontributor utama emisi GRK penggunaan energi Kota Surakarta dengan komposisi mencapai 71% (setara dengan 289745 CO₂e/tahun). Nilai tersebut mengalami peningkatan terhadap tahun sebelumnya. Tren GRK Kota Surakarta masih meningkat dari tahun ke tahun, terutama sebagai dampak aktivitas transportasi.

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 (CO₂), metana (CH₄) dan nitrogen dioksida (N₂O). 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

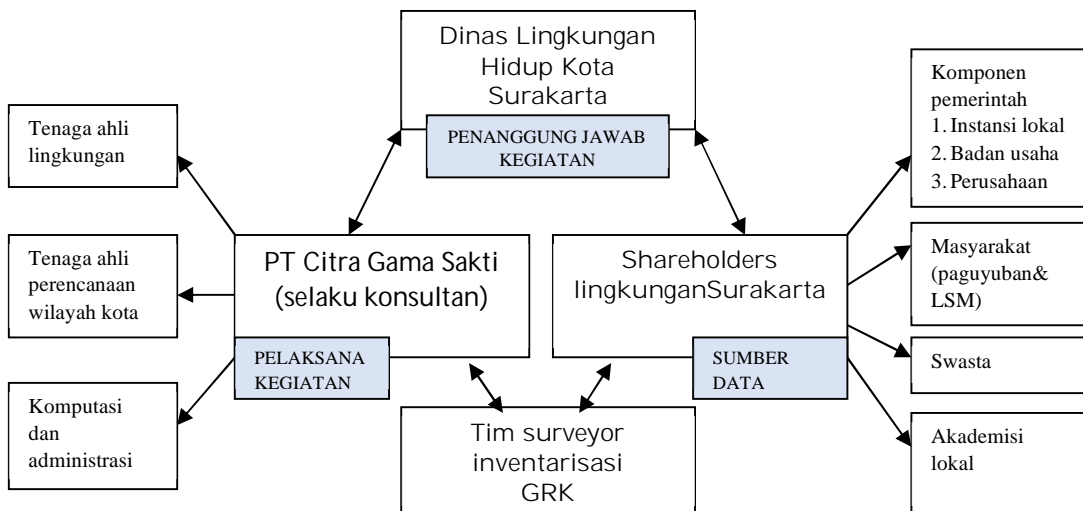
- (pengukuran) udara ambien, data klimatologi dan baku mutu kualitas udara
5. Hitungan beban emisi dapat menjadi input bagi model dispersi emisi atmosferik yang saat ini banyak digunakan dan memegang peranan penting dalam manajemen kualitas udara dan penggunaan lahan perkotaan
 6. Kombinasi hasil inventarisasi 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

METODOLOGI

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 4. Struktur dan hierarki kelembagaan penyusunan dokumen Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) Kota Surakarta tahun 2022

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

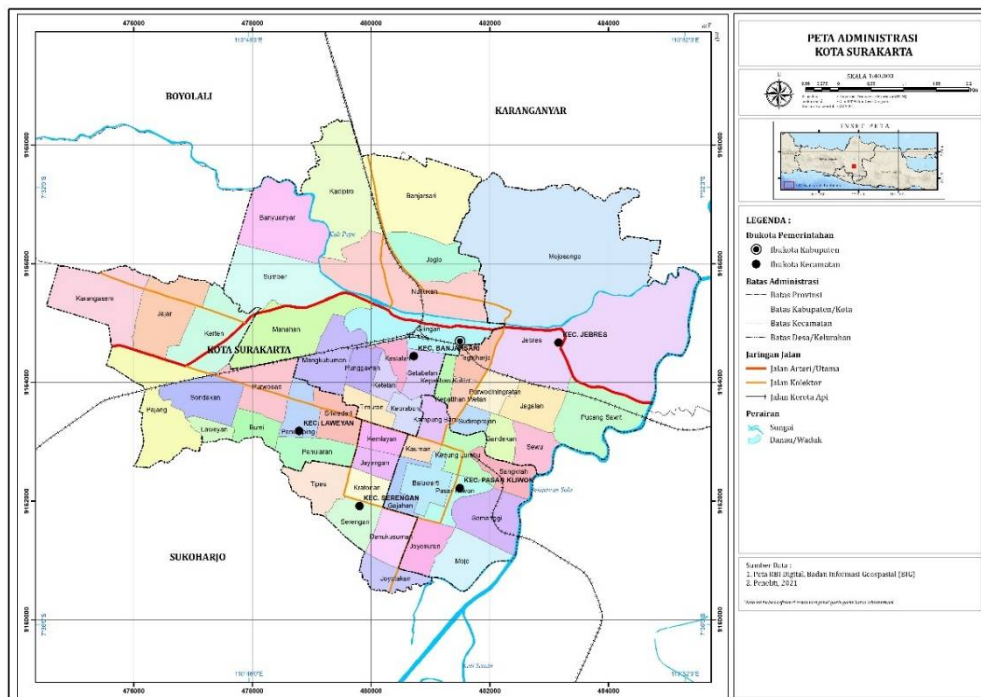
kegiatan adalah PT Citra Gama sakti (CGS) yang terdiri dari ahli lingkungan, ahli perencanaan wilayah kota didukung oleh bagian komputasi dan administrasi.

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 5. 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 2020, dengan mengupayakan secara optimal untuk penggunaan data tahun dasar 2021.

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 (CO₂), metana (CH₄) dan nitrogen dioksida (N₂O). 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 (CO₂), metana (CH₄), nitrogen oksida (NO_x) dan ozon (O₃). Gas rumah kaca merupakan fenomena wajar bahkan turut membantu pembentukan kehidupan di bumi.

Tanpa GRK, suhu bumi kemungkinan hanya akan mencapai -18°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 umum 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

No	Kategori emisi	Detail kegiatan
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 (CO₂), metana (CH₄) dan nitrogen dioksida (N₂O). Ketiganya merupakan parameter emisi dengan produksi dan resiko besar pada aktivitas antropogenik.

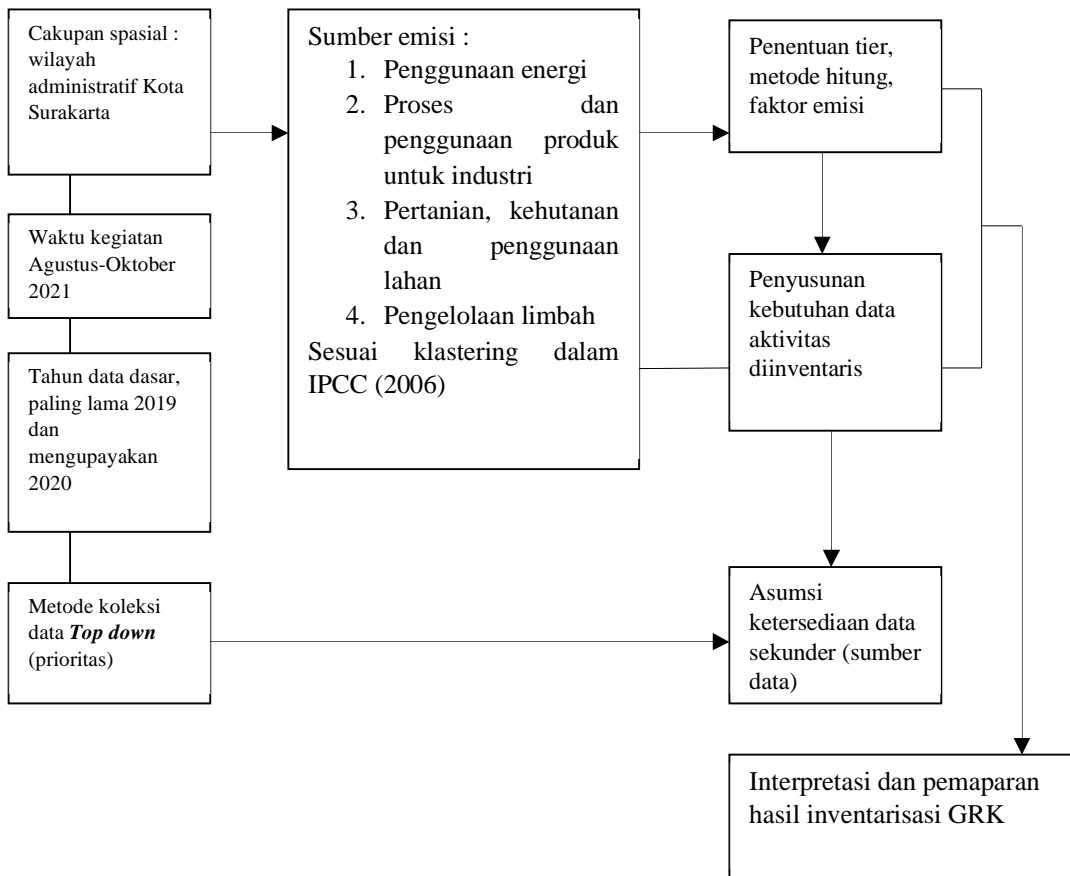
Tabel 2. Jenis gas rumah kaca dan informasi terkait

Jenis gas rumah kaca	Kontributor utama saat ini	Prediksi daur hidup dalam atmosfer	Potensi peringkat pemanasan global dalam 100 tahun
Karbondioksida	Diemisikan secara primer melalui proses pembakaran bahan bakar fosil, limbah pada dan produk tanaman. Alih fungsi lahan menjadi salah satu	Tidak dapat diprediksi, tidak rusak dalam waktu panjang namun hanya dapat mengalami	1

	pemicu peningkatan gas ini. Tanaman memiliki kemampuan untuk menyerap setidaknya hingga sepertiganya, sayangnya kondisi ini diperburuk dengan maraknya deforestasi	perubahan formasi	
Methan	Methan diemisikan dalam proses produksi dan transportasi 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)	12 tahun	21
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 6. 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 CO₂. 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_2 , CH_4 dan N_2O) dikonversikan menjadi karbondioksida ekuivalen (CO_2eq) untuk memudahkan interpretasi. Proses konversi dilakukan dengan memanfaatkan nilai *Global Warming Potential* (GWP) sebagai konstanta pengali variabel non CO_2 . 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_2eq)
1	CO_2	1
2	Methane (CH_4)	21
3	Nitrous Oxide (N_2O)	310
4	PFC-14 (CF_4)	6.500
5	PFC-116 (C_2F_6)	9.200
6	Sulfur hexafluoride (SF_6)	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 Kesetimbangan 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:

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

dimana

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

Perhitungan emisi terhadap kategori Emisi N₂O 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 N₂O 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 N₂O dari pengelolaan kotoran ternak, kg N₂O yr⁻¹
- $N_{(T)}$ = Jumlah populasi jenis/kategori ternak tertentu, jumlah ternak
- $Nex_{(T)}$ = Rata-rata tahunan ekskresi N per ekor jenis/kategori ternak, kg N ternak⁻¹ yr⁻¹
- $MS_{(T,S)}$ = Fraksi dari total ekskresi nitrogen tahunan dari jenis ternak tertentu yang dikelola pada sistem pengelolaan kotoran ternak
- $EF_{3(S)}$ = Faktor emisi langsung N₂O dari sistem pengelolaan kotoran tertentu S, kgN₂O-N/kgN
- S = Sistem pengelolaan kotoran ternak
- T = Jenis/kategori ternak
- 44/28 = Konversi emisi (N₂O)-N(mm) kedalam bentuk N₂O(mm)

Emisi tidak langsung N_2O dari penguapan N dalam bentuk ammonia (NH_3) dan NO_x ($N_2O_{G(mm)}$) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

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

dimana

- $N_2O_{G(mm)}$ = Emisi tidak langsung N_2O akibat dari penguapan N dari pengelolaan kotoran ternak, kgN_2O_{yr-1}
- $N_{volatilization-MMS}$ = Jumlah kotoran ternak yang hilang akibat volatilisasi NH_3 dan NO_x , kgN per tahun
- EF = Faktor emisi N_2O dari deposisi atmosfer nitrogen di tanah dan permukaan air, $kgN_2O-N/(kg NH_3-N+NO_x-N \text{ ter volatilisasi})-1$; default value IPCC adalah 0.01 $kg N_2O-N (kgNH_3-N + NO_x-N \text{ ter volatilisasi})-1$

2. Sumber Agregat dan Sumber Emisi Non- CO_2 pada Lahan

Emisi GRK dari sumber agregat dan sumber emisi non- CO_2 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_2 dari penambahan kapur karbonat kedalam tanah dapat diperkirakan dengan persamaan berikut.

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

dimana

- $CO_2\text{-Emission}$ = Emisi C tahunan dari aplikasi pengapuran ton C per tahun
- M = Jumlah kotoran ternak yang hilang akibat volatilisasi NH_3 dan NO_x , 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_2 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 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_2 dari

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

penggunaan pupuk urea dihitung dengan persamaan berikut

dimana

- $CO_2\text{-C}_{Emission}$ = Emisi C tahunan dari aplikasi pemupukan ton C per tahun
- M_{urea} = Jumlah atau berat dari Urea yang diaplikasikan, ton per tahun
- EF_{urea} = Faktor emisi, ton C per Urea

Emisi N_2O dari tanah yang dikelola dihitung dari emisi langsung (direct N_2O) dan tidak langsung (indirect N_2O) dengan metodologi Tier 1 menggunakan faktor emisi default dari IPCC. Peningkatan N-tersedia dalam tanah meningkatkan proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang

memproduksi N₂O. 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 N₂O langsung dari tanah yang dikelola adalah sebagaimana berikut ini

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

- $N_2O-N_{N\ input}$ = $\{[(FSN+FON+ FCR+FSOM) \times EF1] + [(FSN +FON + FCR +FSOM) \times EF1FR]\}$
- 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 N₂O langsung dari tanah yang dikelola, kg N₂O-N per tahun
- $N_2O-N_{N\ input}$ = Emisi tahunan N₂O langsung dari input N ke tanah yang dikelola, kg N₂O-N per tahun
- N_2O-N_{OS} = Emisi tahunan N₂O langsung dari pengelolaan tanah organik, kg N₂O-N per tahun
- N_2O-N_{PRP} = Emisi tahunan N₂O langsung dari input urin atau kotoran ternak ke padang rumput atau penggembalaan, kg N₂O-N per tahun
- 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, kg N_2O -N per (kg N input)
- EF_{1FR} = Faktor emisi untuk emisi N_2O dari input N untuk sawah irigasi, kg N_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, kg N_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*))
- EF_{3PRP} = Faktor emisi untuk emisi N_2O dari urin dan kotoran yang dideposit di padang rumput atau padang penggembalaan, kg N_2O -N per (kg N input); (CPP: sapi, unggas dan babi, dan SO: domba, dan ternak lain).

Sedangkan persamaan untuk menduga emisi N₂O 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 N₂O langsung dari tanah yang dikelola, kg N₂O- 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) xFracLEACH-(H) x EF5.

$N_2O_{(\text{ATD})}-N$ = Jumlah tahunan N₂O–N yang dihasilkan volatisasi N ke atmosfer dari tanah yang dikelola, kg N₂O–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 NH₃ dan NO_x, kg N tervolatisasi 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 tervolatisasi sebagai NH₃

Emisi CH₄ 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 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 CH₄ dihitung dengan mengalikan faktor emisi harian dengan lama budidaya padi sawah dan luas panen dengan

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

menggunakan persamaan di bawah ini:

Dimana

- CH₄ Rice = Emisi metan dari budidaya padi sawah, Gg CH₄ per tahun
- EF_{i, j, k} = Faktor emisi untuk kondisi i, j, dan k; kg CH₄ per hari
- t_{i, j, k} = Lama budidaya padi sawah untuk kondisi i, j, dan k; hari
- A_{i, j, k} = 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 CH₄ 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 CH₄/m²/musim dengan nilai default rata-rata 160.9 kg CH₄/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 CH₄ (**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

Jenis Tanah	Scaling Factor Tanah Adjusted
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

Kategori	Sub Kategori		SF (IPCC Guidelines 1996)	Adjusted SF (based on current studies in Indonesia)	
Up land	None		0		
Low land	Irrigated	Continuously Flooded	1,0	1,00	
		Intermittent ly 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

No	Variety	Average emission (kg/ha/session)	Scalling Factor
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

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



12	Memberamo	146,2	0,72
13	Dodokan	145,6	0,72
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 terbang 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 dala tiga tipe yaitu :

1. Sumber Titik, merupakan sumber secara tunggal dapat mengkontribusikan 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 enenrgi maupun penggunaan atu 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 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

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



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 km² menjadi 46,72 km².

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.

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. Tren GRK dari sektor transportasi menjadi ancaman laten di masa depan. Hal tersebut dikarenakan kepemilikan kendaraan yang terus mengalami peningkatan dengan penyediaan transportasi publik kurang mendapat atensi positif dari peran serta masyarakat. Efisiensi dari konversi energi maupun teknologi tidak mengimbangi pertumbuhan *demand* dan operasional kendaraan.

Mayoritas faktor emisi dalam inventarisasi ini disitasi dari IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory* (2006). Faktor tersebut mencakup parameter karbondioksida (CO₂), metana (CH₄) dan nitrogen dioksida (N₂O), 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.

Pandemi Covid-19 menjadi tema khas pada beragam kajian beberapa tahun terakhir. Hal ini tidak terlepas dari dampak pandemi pada hampir keseluruhan sektor kegiatan manusia. Pandemi memaksa pemerintah memberlakukan penerapan protokol kesehatan ketat termasuk pembatasan aktivitas. Semenjak triwulan akhir tahun 2021 kondisi telah membaik ditandai dengan normalisasi beragam aktivitas antropogenik termasuk transportasi. Kondisi ini menjadi topik menarik untuk

mengevaluasi dinamika GRK pasca pandemi dan relaksasi kebijakan pembatasan aktivitas.

1. Review Inventarisasi GRK Kota Surakarta Tahun 2021

Hasil inventarisasi gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta tahun 2021 menunjukkan peningkatan emisi secara keseluruhan. Nilai estimasi GRK pada tahun 2021 adalah **3090438,91** tonCO₂eq/tahun. Tren peningkatan tersebut cenderung signifikan meskipun inventarisasi sempat tidak dilaksanakan pada 2020 karena pandemi.

Kontributor utama GRK Kota Surakarta pada inventarisasi emisi 2021 adalah kluster penggunaan energi. Nilai GRK kluster tersebut mencapai **2871388,66** tonCO₂eq/tahun atau setara dengan 93% dari keseluruhan GRK. Tinjauan komposisi menunjukkan ada peningkatan signifikan pada dominasi kluster penggunaan energi. Kenaikan tersebut disebabkan oleh peningkatan konsumsi listrik yang diikuti oleh penurunan pada produksi sampah yang mereduksi emisi metana.

Tabel 7. Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC.

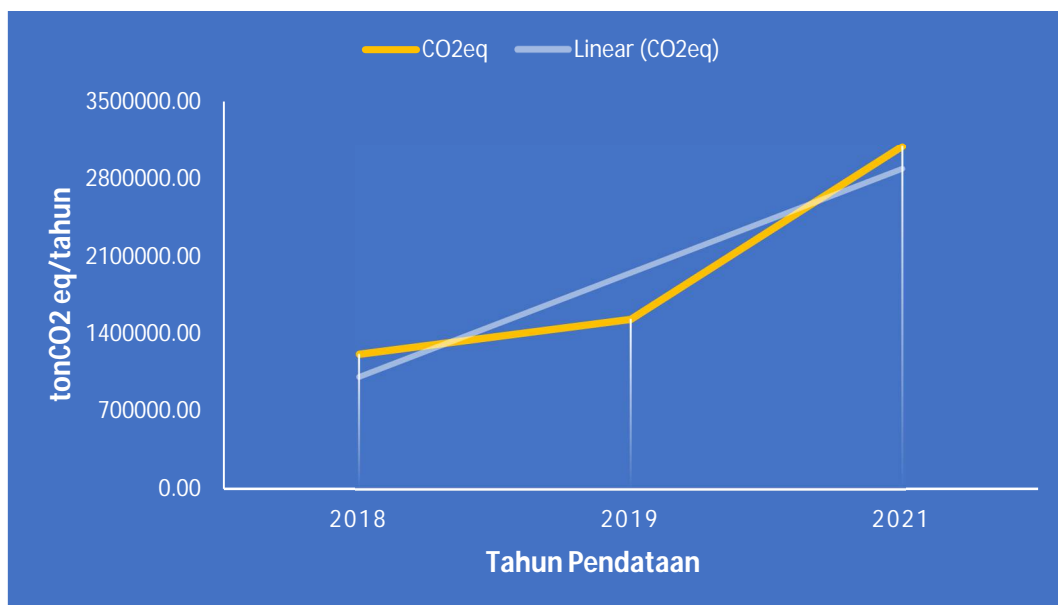
No	Kategori	Emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	Penggunaan energi	2864225,83	128,14	14,43	2871388,66
2	IPPU	2,36	0,00	0,00	2,36
3	AFOLU	59690,73	29,94	1,47	60774,53
4	Pengelolaan limbah	5,50	7299,82	16,04	158273,36
Total emisi GRK		2923924,42	7438,89	31,62	3090438,91

Sumber : hasil perhitungan primer (2021)

Salah satu hal penting pada inventarisasi 2021 adalah tetap dihitungnya GRK dari pertanian. Kota Surakarta secara regulasi RTRW Provinsi dianggap tidak lagi memiliki lahan pertanian melalui penghapusan status sawah lestari. Emisi GRK pertanian kembali dihitung sesuai kesepakatan stakeholder yang memandang bahwa secara riil Kota Surakarta masih memiliki lahan sawah yang memproduksi secara aktif seperti pada kawasan Klodran, Jajar dan Kecamatan Jebres. Operasional kegiatan budidaya sawah tentu saja masih memunculkan emisi GRK dari penggunaan urea, pupuk N alami maupun parikan, pengolahan sawah dan pengolahan tanah.

Kondisi tersebut tentu saja tidak dapat diabaikan begitu saja dari estimasi GRK yang semestinya dapat mewakili dan menggambarkan kegiatan masyarakat setempat.

Karbon dioksida (CO_2) muncul dominan sebagai emisi GRK utama dari kompilasi keseluruhan aktivitas antropogenik Kota Surakarta. Hal ini wajar mengingat parameter tersebut dihasilkan dari seluruh pembakaran sempurna pada penggunaan energi. Penggunaan energi menjadi sektor penghasil GRK masif di wilayah urban karena skala, ragam dan konsistensi aktivitas yang lebih tinggi.

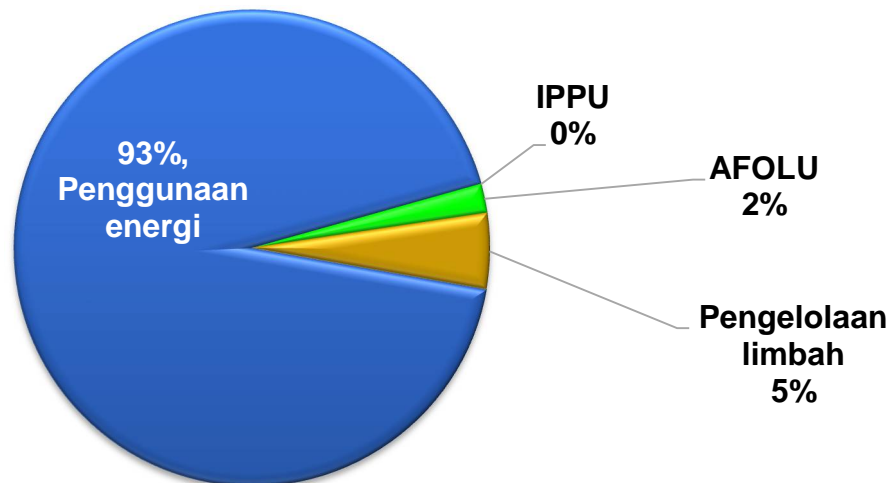


Gambar 7. Tren GRK Kota Surakarta pada 2018-2021

Gambar 5 menunjukkan tren peningkatan GRK Kota Surakarta 2018-2021. Hasil tersebut menunjukkan bahwa GRK masih terus mengalami peningkatan dengan kecenderungan dengan rasio kenaikan tahunan yang stabil. Hal tersebut terlihat pada tren peningkatan yang mengikuti persamaan linear. Kondisi tersebut menunjukkan kebutuhan evaluasi pada mitigasi adaptasi terhadap reduksi GRK yang telah dilakukan untuk meningkatkan efektifitas rencana aksi.

Reinventarisasi GRK 2021 menunjukkan satu hal tidak berubah yakni rendahnya kesadaran masyarakat pada upaya pengendalian emisi. Ketergantungan pada bahan bakar fosil merupakan kondisi sulit dihindari untuk Indonesia maupun sebagian besar kawasan dunia. Hal tersebut

sebagai dampak keterbatasan pengembangan sumber energi alternatif yang mencakup sintesis, produksi, distribusi hingga pemassalannya. Pada kondisi demikian, maka faktor kunci dalam pengendalian emisi adalah aspek sosiokultur masyarakat. Ketika masyarakat mulai dapat bersinergi dengan shareholder lingkungan lain, niscaya emisi akan dapat dikelola. Ketidakhadiran masyarakat secara utuh dalam upaya pengendalian emisi akan menyebabkan program program yang disusun pemerintah maupun beragam kajian akademik cenderung menjadi sia-sia dan hanya menghabiskan energi serta sumber daya lain.



Gambar 8. Dinamika komposisi kontribusi GRK pada setiap kluster di inventarisasi 2021

Penggunaan energi merupakan kluster dengan peningkatan beban emisi signifikan pada rentang dua inventarisasi (2019-2021). Kluster ini tidak hanya bertambah secara nilai emisi namun juga ditinjau dari proporsi terhadap emisi lainnya. Pada inventarisasi 2019, kontribusi kluster penggunaan energi mencapai 84% dan meningkat menjadi 93% pada tahun 2021. Berdasarkan sub kegiatan yang ada dalam kluster penggunaan energi, kondisi tersebut didorong oleh peningkatan pada konsumsi listrik (akan dibahas lebih detail pada deskripsi kluster penggunaan energi). Kondisi pandemi berhasil menurunkan konsumsi bahan bakar transportasi namun memunculkan peningkatan pada konsumsi listrik. Pembatasan mobilitas yang menjadikan rumah-rumah sebagai sentra kegiatan (melalui

konsep *daring*) memiliki dampak pada peningkatan konsumsi energi pada masing masing rumah yaitu listrik.

2. Hasil Inventarisasi GRK Kota Surakarta Tahun 2022

a. General Review

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 tonCO₂eq 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).

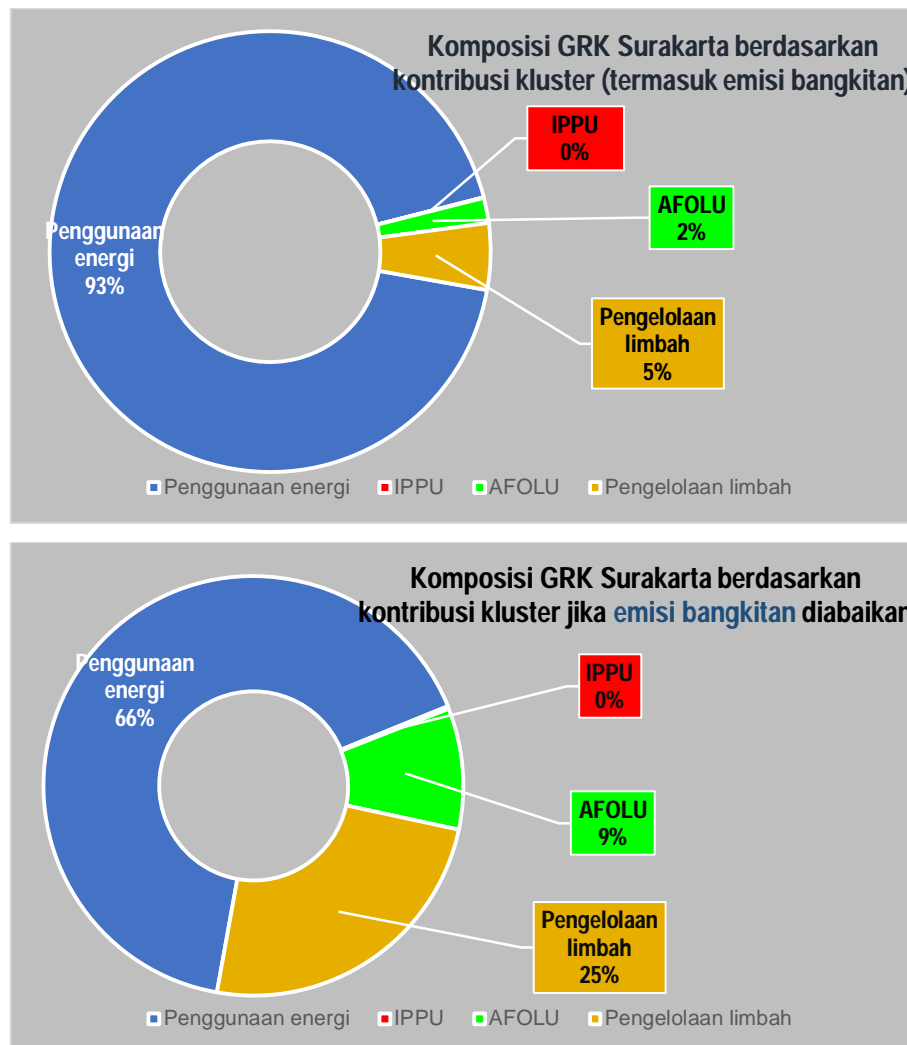
Tabel 8. Hasil perhitungan umum GRK Kota Surakarta per kategori sumber emisi IPCC tahun inventarisasi 2022

No	Kategori	Emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ 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

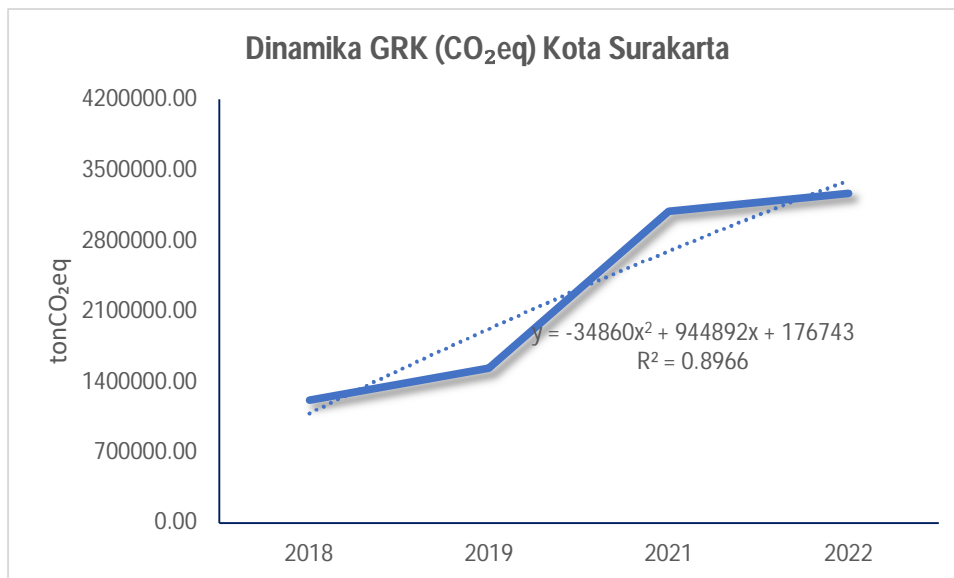
Penggunaan energi masih menjadi kontributor GRK utama di Kota Surakarta dengan nilai mencapai 93% keseluruhan sumber (3,04 juta ton CO₂eq). Kontribusi kluster penggunaan energi masih setara dengan kondisi tahun sebelumnya. Nilai tersebut diperoleh dengan turut memperhitungan emisi bangkitan pada penggunaan 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 tonCO₂eq. Eliminasi bangkitan memunculkan proporsi lebih besar dari kluster lain secara berturut-turut adalah pengelolaan limbah (25%) dan AFOLU (9%).



Gambar 9. 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 10. Dinamika gas rumah kaca (GRK) Kota Surakarta pada periode inventarisasi 2018-2022

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 CO₂, CH₄ dan N₂O. Gas emisi yang dominan dihasilkan tentunya berupa karbondioksida (CO₂). Setiap pembakaran sempurna pada karbon akan menghasilkan karbondioksida. Emisi karbondioksida tidak banyak dipengaruhi oleh teknologi pembakaran. Karakter yang berbeda dengan emisi CH₄ dan N₂O yang signifikan dipengaruhi oleh teknologi pembakaran yang diaplikasikan. Gas 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 CO₂ pada kegiatan kegiatan CO₂ di formasi 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 dispesifikan lagi ke dalam aktivitas 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 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. Keberadaan akses pintu tol pada wilayah aglomerasi turut menambah potensi mobilitas tersebut sekaligus masuknya kendaraan transit antar kota/provinsi.

Kajian pada tahun 2022 menambahkan pendekatan hitung berbasis pantaun 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 9. Hasil inventarisasi GRK kluster pengadaan dan penggunaan energi Kota Surakarta tahun 2022

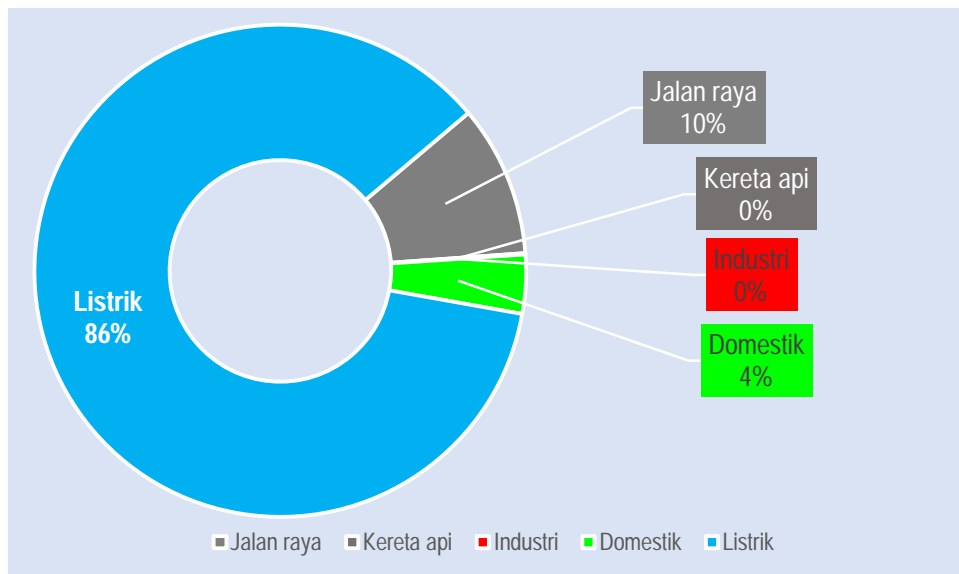
No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	NO ₂	
1	Transportasi				
a	Jalan raya	302190.00	112.00	15.00	309192.00
b	Kereta api	2143.80	0.11	0.11	2181.41
2	Industri	447.05	0.01	0.00	447.89
3	Domestik	117681.53	13.18	0.24	118031.74
4	Listrik	2616555.44	0.00	0.00	2616555.44
Sum Total Energy		3039017.82	125.30	15.35	3046408.49

Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2022)

Total emisi GRK yang dikontribusikan oleh kluster pengadaan dan penggunaan energi pada tahun 2022 adalah 3046408,49 tonCO₂eq/tahun. Secara umum terdapat peningkatan GRK pada kluster ini terhadap hasil inventarisasi sebelumnya (tahun 2021). Rasio peningkatan tahunan kluster ini mencapai 5,74%, menurun dibandingkan sebelumnya.

Konsumsi listrik merupakan sektor dengan kontribusi GRK terbesar pada kluster ini. Kontribusi penggunaan listrik mencapai 2616555,44 tonCO₂eq/tahun atau setara 86% keseluruhan emisi (gambar 10). Nilai komposisi relative stabil, tidak mengalami perubahan dari tahun sebelumnya. Sifat emisi listrik di Kota Surakarta hanya sebagai bangkitan. Hal ini bermakna bahwa konsumsi listrik yang dilakukan masyarakat Surakarta hanya membangkitkan atau menambah beban emisi langsung pada pembangkit listrik sebab di dalam wilayah Kota Surakarta tidak ada

pembangkit listrik. Dampak secara langsung dari emisi bangkitan hanya dirasakan pada wilayah yang memiliki fasilitas pembangkit listrik.

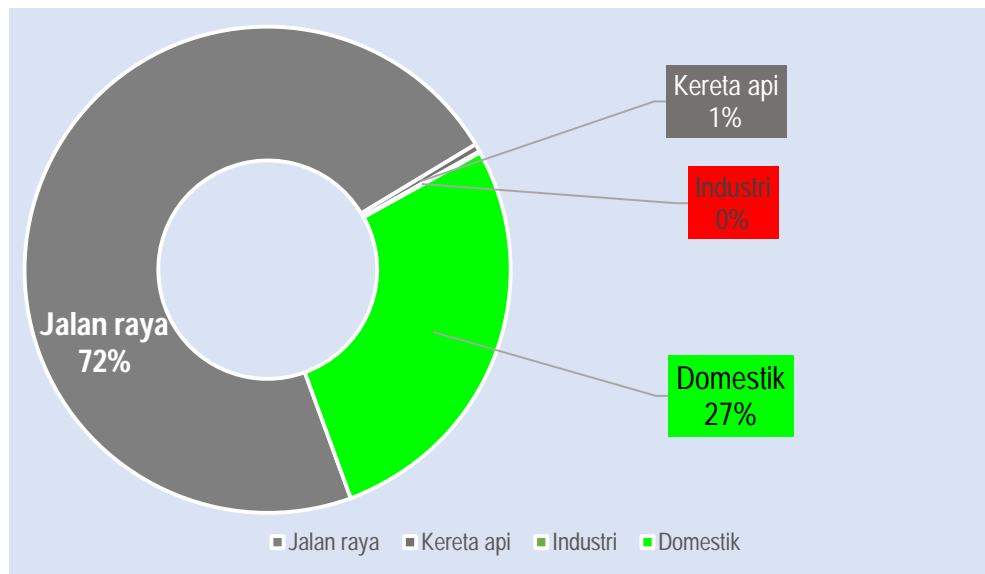


Gambar 11. Komparasi kontribusi emisi kluster pengadaan dan penggunaan energi dengan bangkitan konsumsi listrik

Komposisi kontribusi GRK dapat divariasikan dengan mengeliminasi penggunaan listrik karena sifatnya sebagai bangkitan. Variasi tersebut memunculkan kontribusi besar dari kegiatan transportasi jalan raya. Kontribusi transportasi jalan raya mencapai 72% dari keseluruhan GRK kluster pengadaan dan penggunaan energi (Gambar 11). Dominasi tersebut mengalami peningkatan 1% dibandingkan tahun sebelumnya. Urutan kontributor berikutnya adalah aktivitas rumah tangga dengan persentase 27%. Nilai tersebut mengalami penurunan 1% dibandingkan komposisi tahun sebelumnya.

Kenaikan dan penurunan nilai kontribusi kedua kegiatan terhadap keseluruhan GRK kluster pengadaan dan penggunaan energi dipengaruhi oleh kondisi pandemi. Tahun 2021 kondisi pandemi membaik dan aktivitas harian kembali mendapatkan kelonggaran pelaksanaan. Salah satunya adalah kegiatan perkantoran dan pendidikan yang kembali pada sistem tatap muka. Aktivitas perdagangan dan pariwisata pun perlahan kembali menuju intensitas normal. 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 dan potensi rebound effect akibat pandemi.



Gambar 12. Komparasi kontribusi emisi kluster pengadaan dan penggunaan energi dengan bangkitan konsumsi listrik

(1) Sektor Transportasi

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

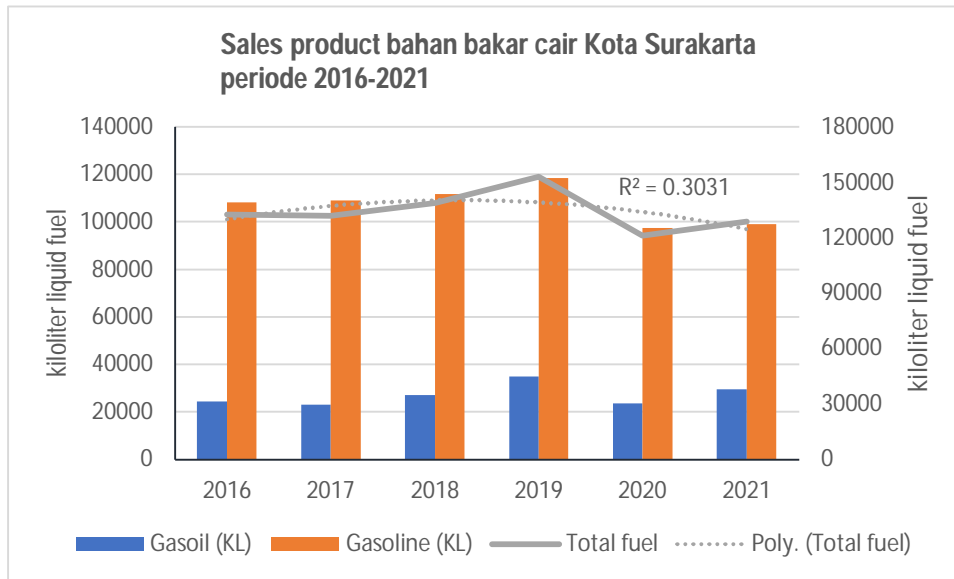
beralih pada moda publik. Moda pribadi tetap menjadi preferensi utama karena alasan kenyamanan. Masyarakat pun memiliki kecenderungan enggan menggunakan moda ramah lingkungan untuk bermobilitas seperti sepeda dan berjalan kaki.

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 internal 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.

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.



Gambar 13. Dinamika konsumsi bahan bakar transportasi Kota Surakarta pada periode 2016-2020 (sumber data : pengolahan data BPS Provinsi Jawa Tengah, 2022)

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 akibat pembatasan mobilitas (Gambar 9). 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 ($r^2 : 0,3031$). Fluktuasi tersebut yang secara langsung mempengaruhi nilai GRK Kota Surakarta.

Penjualan bahan bakar transportasi tahun 2021 masih didominasi oleh jenis gasoline. Total penjualan keseluruhan mencapai 128546 kL yang terdiri dari 98942 kL gasoline (bensin) dan 29604 gasoil (solar). Dominasi tipe bahan bakar gasoline (76,97%) 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.

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 10. Net calorific value (NCV) dan faktor emisi aktivitas transportasi

No	Jenis Bahan Bakar	NCV (GJ/l)	Faktor emisi (kg/TJ)			Keterangan
			CO ₂	CH ₄	N ₂ 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.

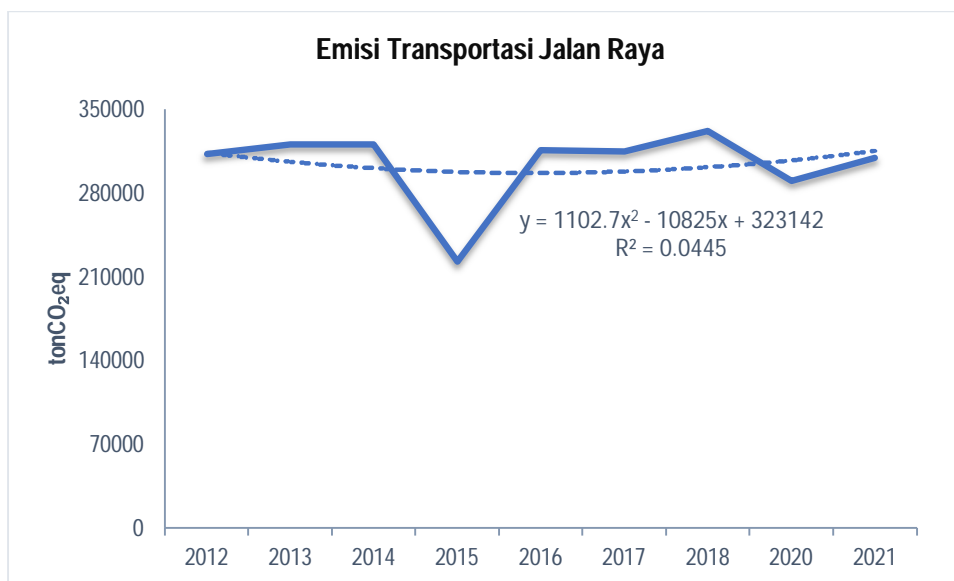
Tabel 11. Hasil Inventarisasi GRK Sektor Transportasi Tahun 2022

No	Kategori	Estimasi emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	Jalan raya	302190.00	112.00	15.00	309192.00
2	Kereta api	2143.80	0.11	0.11	2181.41
Total Emisi transport		304333.80	112.11	15.11	311373.41

Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2022)

Transportasi masih muncul sebagai ancaman bagi harmoni lingkungan udara Kota Surakarta (lihat pie chart pada gambar 11). Sektor transportasi jalan raya merupakan kontributor GRK terbesar pada kluster penggunaan energi. Pada inventarisasi tahun 2022 nilai GRK sektor ini mencapai 309192 tonCO₂eq atau setara dengan 10% GRK kluster penggunaan energi bila memasukkan bangkitan listrik. Estimasi tanpa memasukkan emisi bangkitan menghasilkan proporsi GRK lebih besar dari transportasi jalan raya mencapai 72%.

Nilai GRK tersebut diperoleh dari data aktivitas penjualan bahan bakar cair (gasoline maupun gasoil) di Kota Surakarta pada tahun 2021. 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.



Gambar 14. Dinamika gas rumah kaca (GRK) transportasi on road Kota Surakarta periode 2012-2021 (Sumber : pengolahan data primer, 2022)

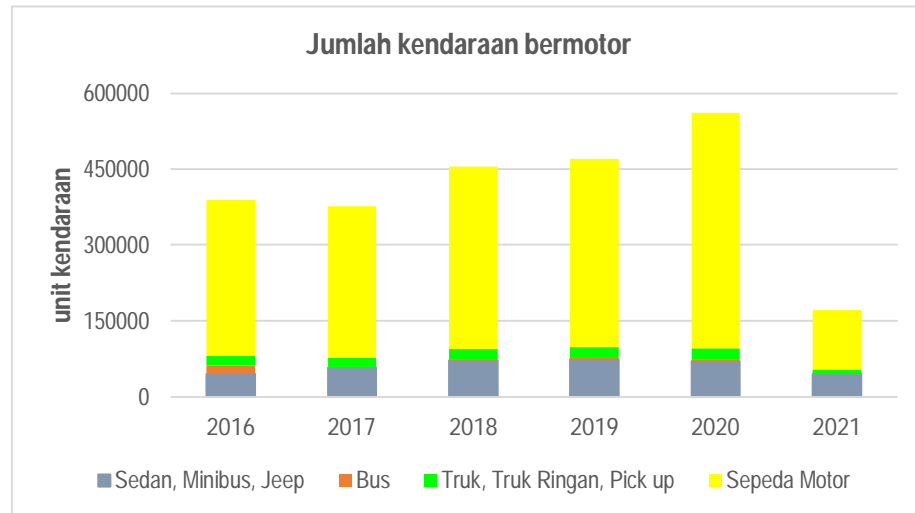
Nilai GRK dari penggunaan bahan bakar transportasi cenderung lebih fluktuatif ($r^2 : 0,0445$). Peningkatan nilai tersebut dipengaruhi oleh faktor jumlah bahan bakar terjual, regulasi distribusi (pembatasan) dan jenis bahan bakar. Peningkatan total konsumsi bahan bakar cair diikuti dengan konversi jenis 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 pada tahun 2021.

Studi Komparasi : Bottom Up Inventory pada Gateways Kota Surakarta

Sales product bahan bakar cair kota Surakarta cenderung mengalami peningkatan pada 2021. Nilai penjualan tersebut kembali naik (rebound) mendekati nilai pada periode tepat sebelum pandemi. Kenaikan penjualan cukup signifikan ketika kondisi membaik tahun lalu bahkan melampaui rasio kenaikan penjualan sebelum era pandemi. Hal ini praktis meningkatkan GRK transportasi jalan raya karena basis data hitungan IPCC secara absolut hanya menggunakan data tersebut.

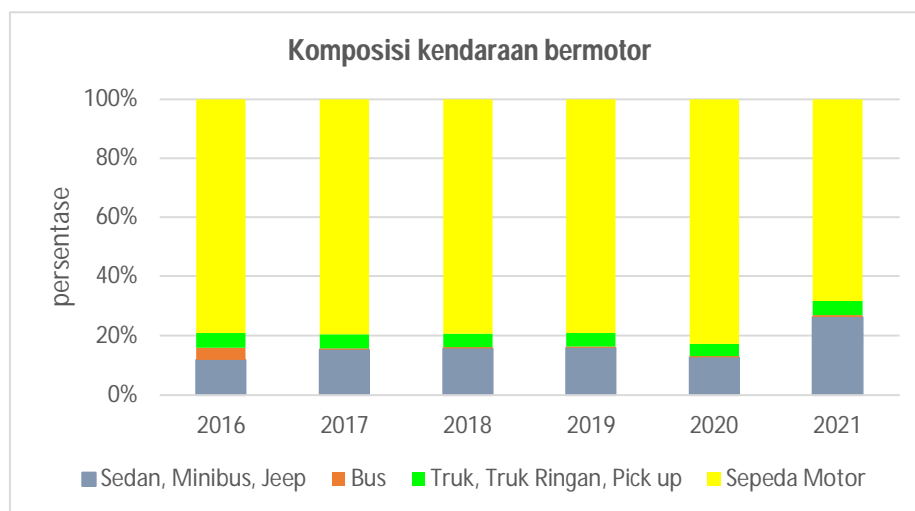
Kota Surakarta memiliki karakter khas wilayah yang berhimpit dengan kabupaten lain dan menjadi kawasan pusat perekonomian maupun layanan jasa. Kawasan tersebut dikenal dengan Subosukowonosraten (Surakarta, Boyolali, Sukoharjo, Wonogiri, Sragen dan Klaten) atau Greater Solo. Interaksi, mobilitas maupun keterikatan aktivitas antropogenik antar kawasan sangat intens. Hal ini memberikan beberapa konsekuensi dan resiko pada lingkungan, termasuk kualitas udara.

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 15,6 juta kendaraan pada bulan Agustus 2022. Nilai tersebut jelas melampaui secara signifikan jumlah kendaraan teregistrasi Kota Surakarta yang pada tahun 2021 malah mengalami penurunan signifikan.



Gambar 15. Jumlah kendaraan bermotor teregistrasi di Kota Surakarta (Sumber : Unit Pengelolaan Pendapatan Daerah (UPPD) Kota Surakarta dalam BPS, 2022)

Komposisi kendaraan Kota Surakarta dominan oleh penciri kendaraan pribadi seperti sepeda motor dan mobil (Gambar 12). Berdasarkan pencatatan oleh unit pengelolaan pendapatan daerah (UPPD) terjadi perubahan komposisi pada tahun data 2021. Komposisi jenis mobil sedan, minibus dan jeep mengalami peningkatan lebih signifikan.



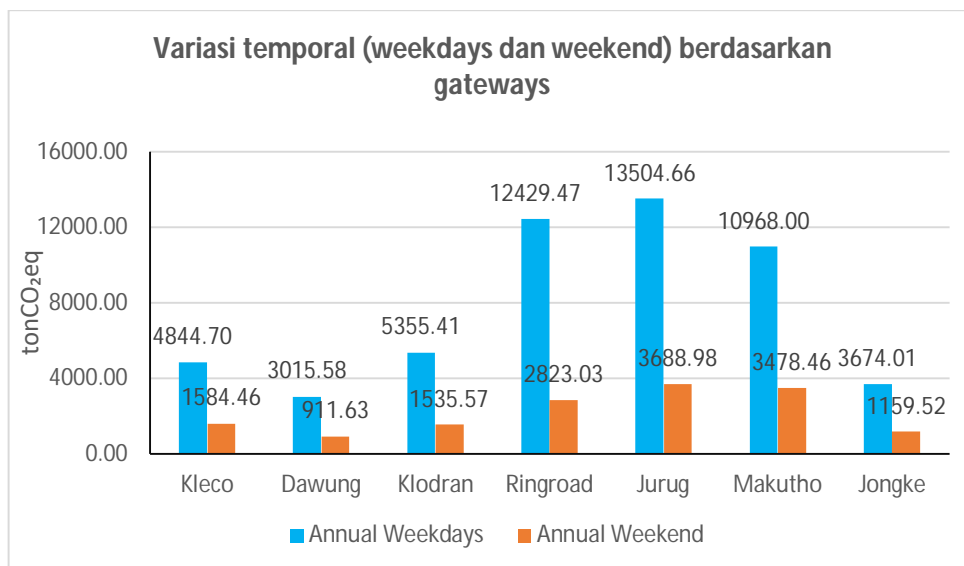
Gambar 16. Komposisi jenis kendaraan Kota Surakarta (Sumber : Unit Pengelolaan Pendapatan Daerah (UPPD) Kota Surakarta dalam BPS, 2022)

Kondisi tersebut menyebabkan ketidakpastian (*uncertainties*) perhitungan dengan hanya berbasis penjualan bahan bakar lokal tinggi. Kemungkinan

akan terjadi *underestimate* jika hanya menggunakan data penjualan bahan bakar. Sebagian besar kendaraan komuter diprediksikan mengisi bahan bakar di luar wilayah administrasi (misal pada lokasi domisil) yang tidak tercatat oleh data penjualan lokal.

Hal ini mendorong perlu dilakukan perhitungan dengan pendekatan bottom up untuk mendapatkan data sebenarnya. Inventarisasi tahun 2022 mencoba menghitung GRK transportasi jalan raya secara bottom up. Basis data aktivitas adalah hitungan LHR selama 24 jam hasil pantauan CCTV Dishub selama bulan Agustus 2022. Untuk sementara, perhitungan dibatasi pada gateways Kota Surakarta yang terbagi dalam 7 jalur major yaitu : Kleco, Dawung, Klodran, Ringroad, Jurug, Makutho dan Jongke. Ketujuh jalur tersebut merupakan akses *mainstream* bagi komuter maupun pelintas wilayah untuk memasuki/melewati Surakarta.

Berikut adalah grafis simulasi emisi tahunan dari 7 *major gateways* Kota Surakarta



Gambar 17. Simulasi GRK tahunan pada jalur gateways Surakarta (tidak menggunakan pendekatan panjang jalan tertentu) (Sumber : Nancy dan Himawan, 2022)

Hasil simulasi tahunan pada gateways menunjukkan total emisi mencapai 68973,47 tonCO₂eq hanya untuk 15,04 km jalur pantauan. Nilai masing masing gateways berbeda. Nilai GRK tertinggi diperoleh pada Jurug dan Ringroad dan terendah pada Dawung dan Jongke. Secara umum, GRK

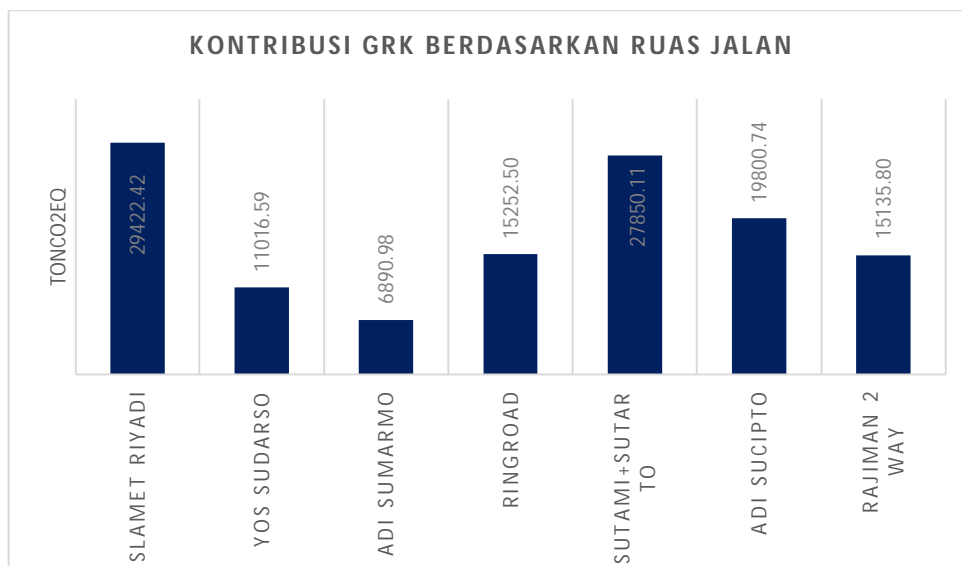
gateways lebih tinggi pada *weekdays* (hari kerja) dibandingkan *weekend* (akhir pekan). Kondisi tersebut menguatkan asumsi kontribusi yang besar dari aktivitas komuter terhadap GRK Kota Surakarta. Komuter lebih banyak terjadi saat hari kerja untuk keperluan pekerjaan rutin, perdagangan maupun pemenuhan jasa.

Konversi masing masing jalur pada panjang jalan asli menghasilkan peningkatan emisi karena perubahan jarak tempuh menjadi 25,27 km. Berikut detail informasi dari masing masing jalan tersebut

Tabel 12. Informasi umum *gateways* Kota Surakarta

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

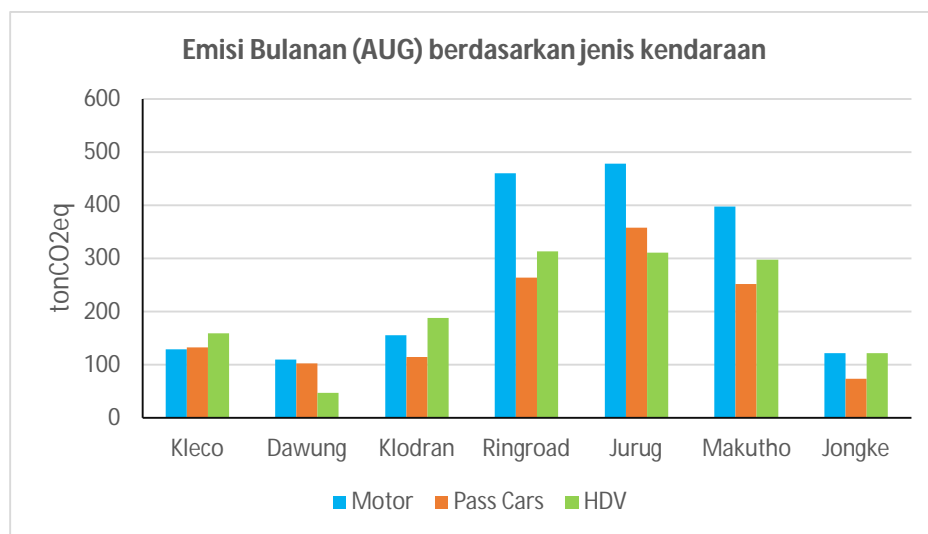
Berikut adalah grafis GRK jika diperhitungkan berdasarkan panjang jalan sesuai tabel 10 tersebut.



Gambar 18. Simulasi GRK tahunan berdasarkan panjang ruas jalan sebagai akses masuk Kota Surakarta (Sumber : Nancy dan Himawan, 2022)

Perhitungan berdasarkan panjang jalan menghasilkan nilai GRK tahunan 125369,1 tonCO₂eq. Nilai tertinggi pada jalan Slamet Riyadi dan kombinasi jalan Ir. Sutami serta Sutarto. Jalan Slamet Riyadi memiliki peran ganda sebagai gerbang utama dari arah barat sekaligus jalur *central business district* Kota Surakarta. Jalan Ir Sutami dan Sutarto menjadi gerbang utama dari arah timur. Perhitungan tersebut telah mengkombinasikan antara *weekdays* dan *weekend*. Nilai yang dihasilkan tersebut baru mewakili 25,27 km jalan di Surakarta. Data BPS menunjukkan panjang total jalan di Surakarta mencapai 245,68 km. Penggunaan rata-rata emisi per kilometer dikalikan dengan keseluruhan panjang jalan akan menghasilkan estimasi GRK bottom up berbasis lalu lintas harian di Kota Surakarta yaitu sebesar 1218864 tonCO₂eq/tahun. Nilai tersebut nyaris 4 kali lipat hasil hitung GRK berbasis penjualan bahan bakar.

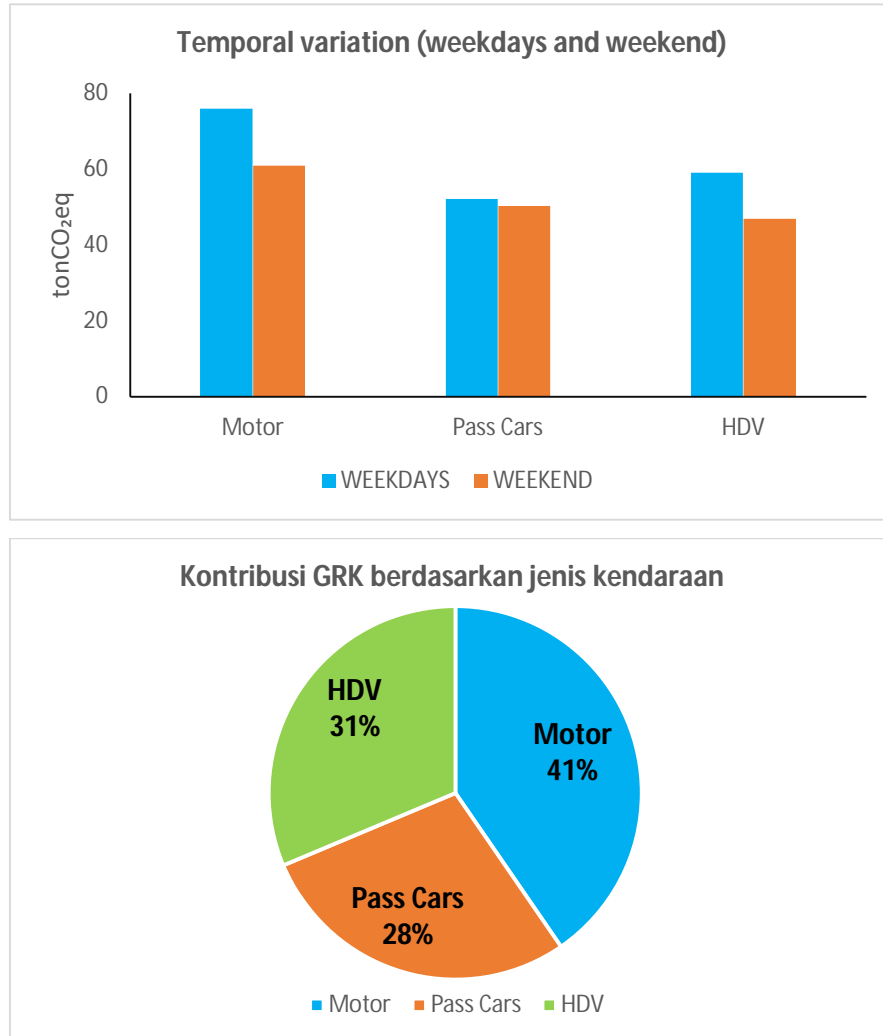
Perhitungan secara bottom up menghasilkan data terkait sebaran emisi bulanan pada setiap lokasi berdasarkan jenis kendaraan dengan hasil sebagai berikut.



Gambar 19. Emisi bulanan *gateways* Kota Surakarta pada Agustus 2022 berdasarkan jenis kendaraan (Sumber : Nancy dan Himawan, 2022)

Hasil pantauan emisi bulanan menunjukkan dominasi sepeda motor dalam menyumbang GRK pada hampir seluruh *gateways*. Dominasi sepeda motor hanya tergantikan pada jalur Kleco dan Klodran oleh jenis HDV (bus

maupun truk). Dominasi sepeda motor yang mutlak merupakan kendaraan pribadi menunjukkan preferensi dan ketergantungan tinggi pada moda pribadi sekaligus keenganan memanfaatkan moda publik, terutama kelompok komuter.



Gambar 20. Kontribusi GRK jenis kendaraan pada gateways Kota Surakarta dengan pendekatan emisi rata-rata/hari (Sumber : Nancy dan Himawan, 2022)

Pada estimasi bulanan, sepeda motor menghasilkan 1851,17 tonCO₂eq atau setara 41% seluruh GRK. Nilai tersebut diikuti GRK dari HDV setara 31% dan mobil penumpang 28%. Dominasi HDV atas mobil penumpang terutama terjadi pada hari kerja (*weekdays*). Sesi *weekend* menunjukkan nilai emisi mobil penumpang sedikit melampaui HDV. Hal tersebut

mengindikasikan bahwa GRK HDV yang tinggi saat weekdays lebih dikontribusikan oleh angkutan truk logistik, bukan bus transportasi publik.

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 GAPEKA 2021 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 2022 mencapai 2181,41

tonCO₂eq/tahun. Nilai tersebut tergolong stabil dibandingkan tahun sebelumnya. 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.



Gambar 21. 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

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.

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

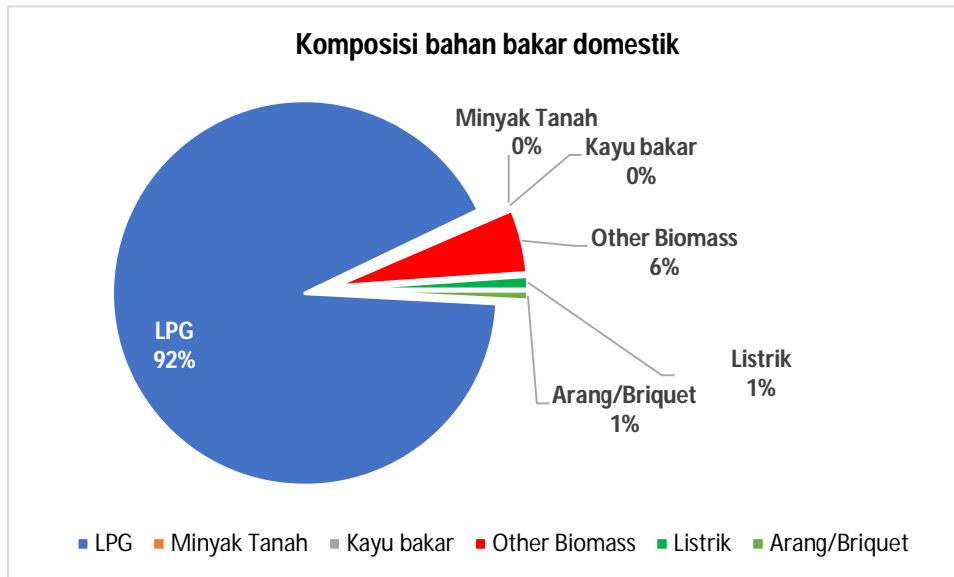
h) Kecenderungan pendekatan modifikasi yang masih

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.

(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 22. Komposisi konsumsi bahan bakar rumah tangga Kota Surakarta tahun 2021

Berdasarkan data tahun 2021 bahan bakar rumah tangga dominan oleh penggunaan LPG. Hal ini tentu sebagai imbas konversi LPG. Kecenderungan penggunaan LPG meningkat dari tahun ke tahun mengikuti kebutuhan memasak yang ditentukan oleh jumlah populasi. Peningkatan konsumsi LPG pada 2021 memiliki rasio terbesar dibandingkan tahun-tahun sebelumnya (8,33%). Kondisi tersebut diprediksikan merupakan rebound effect situasi saat pandemi. Asumsi ini berasal dari fakta bahwa bahan bakar LPG domestik juga banyak digunakan pada angkringan maupun warung milik warga. 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% populasi telah memanfaatkan listrik sebagai bahan bakar domestik.

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 13. Konsumsi bahan bakar domestik Kota Surakarta 2022

No	Sektor Pengguna	Jenis Bahan Bakar	Konsumsi (ton/tahun)
1	Domestik	LPG	39432,86
		Kayu Bakar	882,11

Sumber : BPS Kota Surakarta (2022)

Total konsumsi LPG untuk rumah tangga (domestik) mencapai 39432,86 ton/tahun yang menjadi angka wajar bagi sebuah kawasan perkotaan skala kecil-menengah. Jumlah tersebut setara dengan konsumsi per keluarga mencapai 14,52 kg/bulan (asumsi jumlah keluarga pada 2021 sebesar 194898 keluarga). Nilai tersebut mengalami penurunan di tahun sebelumnya. Hal ini mengindikasikan aktivitas kembali normal sehingga penggunaan memasak pada rumah tangga berkurang. 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 14 *Net calorific value* (NCV) dan faktor emisi aktivitas domestik

No	Jenis Bahan Bakar	NCV (GJ/t)	Faktor emisi (kg/TJ)			Keterangan
			CO ₂	CH ₄	N ₂ 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 diperhitungkan estimasi emisi untuk bahan bakar memasak sektor domestik (rumah tangga) dengan hasil sebagai berikut.

Tabel 15. Emisi aktivitas domestik Kota Surakarta tahun 2022

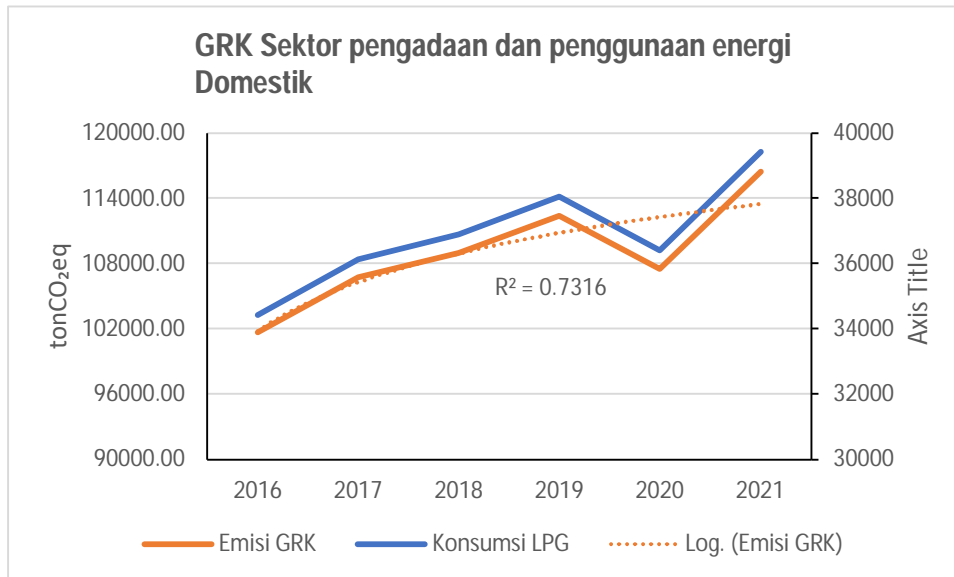
No	Sektor	Jenis bahan bakar	Estimasi emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	Domestik	LPG	116199.59	9.21	0.18	116450.03
		Kayu bakar	1481.94	3.97	0.05	1581,71
Emisi domestik			117681.53	13.18	0.24	118031.74

Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2022)

Total GRK dari sektor penggunaan energi memasak domestik mencapai 118031,74 tonCO₂eq/tahun. Konsumsi LPG sebagai bahan bakar domestik utama mengalami peningkatan pada tahun 2021. Emisi dari penggunaan kayu bakar mengalami penurunan. Penurunan konsumsi kayu bakar merupakan kondisi positif bagi upaya mitigasi GRK lokal. 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.

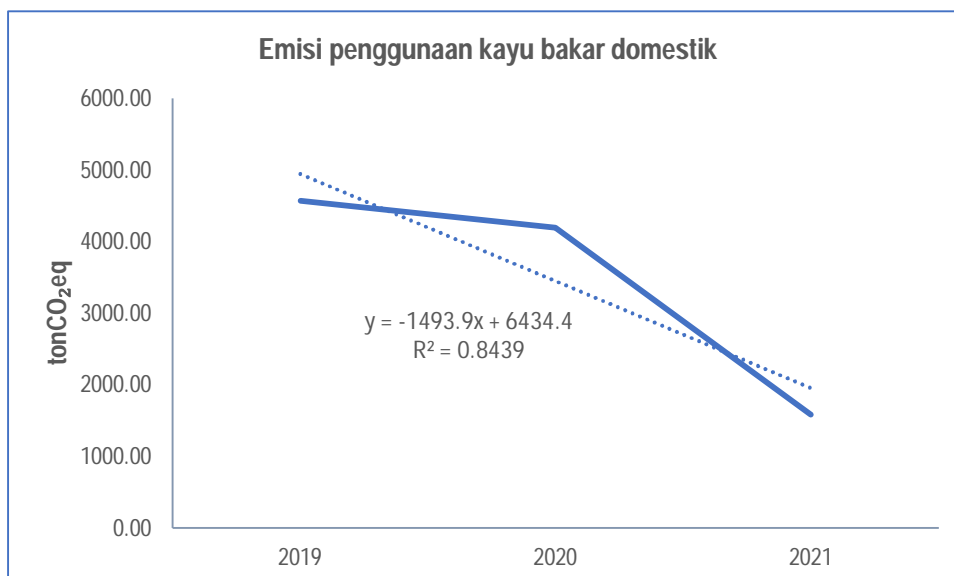
Kelebihan LPG adalah memiliki *net calorific value* yang tinggi sehingga memungkinkan efektivitas lebih baik dalam sebuah proses pembakaran. Oleh sebab itu, konversi total bahan bakar domestik menjadi LPG telah menjadi upaya pengelolaan yang ideal untuk menekan rasio peningkatan GRK dari sektor domestik. Konklusi hasil inventarisasi adalah perlu percepatan konversi LPG untuk bahan bakar domestik.

Gambar 14 menunjukkan bahwa jumlah konsumsi LPG memegang peranan mutlak pada fluktuasi GRK domestik. 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 23. 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 ($r^2 : 0,8439$). Situasi ini menjadi penanda keberhasilan stakeholder lokal dalam melakukan konversi menuju bahan bakar ramah lingkungan.



Gambar 24. 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 (CO₂). 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 tonCO₂/MWh. Berikut adalah data konsumsi listrik Kota Surakarta pada setiap sektor kegiatan pada tahun 2021.

Tabel 16. Konsumsi listrik berdasarkan kelompok konsumen tahun 2022

No	Sektor Konsumen	Konsumsi (MWh)
		2021
1	Rumah tangga	1115325.057
2	Industri	1407911.194
3	Sosial	136391.609
4	Bisnis	430290.385
5	Kantor	27685.211
6	Penerangan Jalan	61686.265
TOTAL KONSUMSI (MWh)		3179289.721

Sumber : BPS Jawa Tengah (2022)

Konsumsi listrik pada tahun 2021 mencapai 3179289,72 MWh. Nilai tersebut mengalami 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 kembali meningkat mendekati pola pada tahun terakhir sebelum terjadi pandemi.

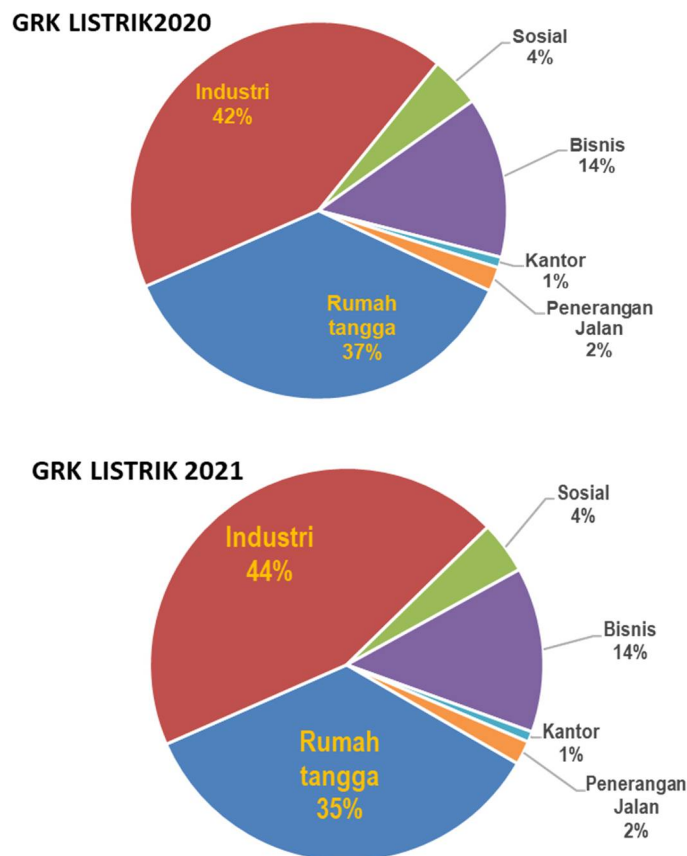
Menggunakan data aktivitas konsumsi listrik Kota Surakarta dan faktor emisi lokal, dapat diperhitungkan emisi konsumsi listrik dengan hasil sebagai berikut

Tabel 17 Emisi bangkitan listrik Kota Surakarta tahun 2022

No	Sektor Konsumen	Emisi
		tonCO ₂ /tahun
1	Rumah tangga	917912.5219
2	Industri	1158710.913
3	Sosial	112250.2942
4	Bisnis	354128.9869
5	Kantor	22784.92865
6	Penerangan Jalan	50767.7961
TOTAL EMISI (tonCO₂/tahun)		2616555.44

Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2022)

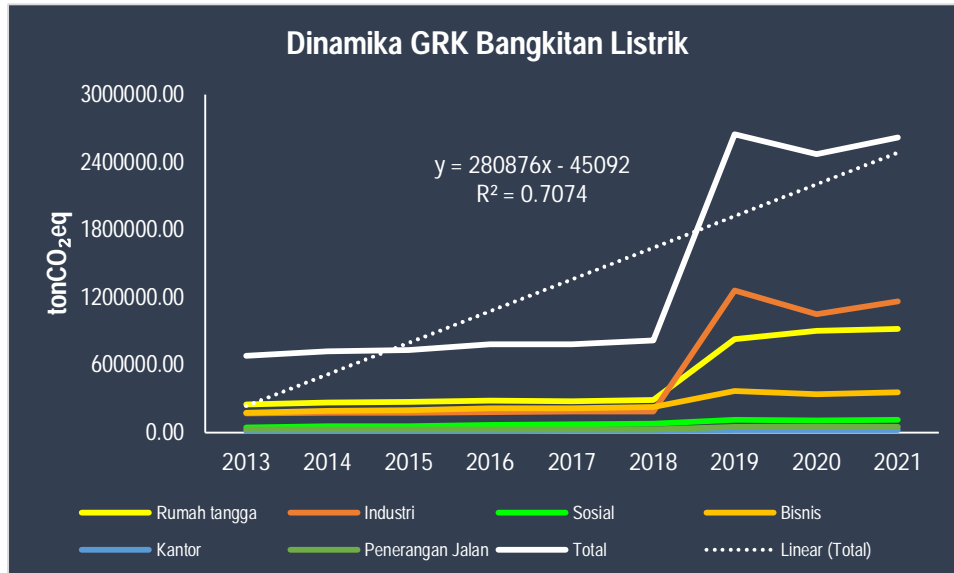
Total GRK yang dikontribusikan oleh bangkitan listrik Kota Surakarta sebesar **2616555.44** tonCO₂eq/tahun. Angka itu terutama dikontribusikan oleh sektor industri dan rumah tangga sebagai konsumen terbesar. Konsumsi listrik senantiasa memunculkan nilai tertinggi pada inventarisasi emisi GRK modern, khususnya untuk wilayah perkotaan. Kondisi ini tidak terlepas dari dominasi listrik sebagai sumber energi utama peralatan modern dengan ketergantungan tinggi dari aktivitas antropogenik modern.



Gambar 25. Dinamika komposisi GRK bangkitan listrik Kota Surakarta pada tahun 2020 dan 2021

Perubahan kondisi pandemi pada 2020 dan 2021 menjadi sumber dinamika konsumsi listrik. Konsumsi pada tahun 2020 sempat menurun akibat pembatasan aktivitas. Masyarakat dipaksa tinggal di rumah dan melaksanakan kegiatan dari lokasi tersebut. Pandemi membaik pada medio 2021 sehingga mengembalikan beragam aktivitas menuju normal. Hal tersebut mempengaruhi rebound konsumsi listrik. Nilai kenaikan GRK mendekati kondisi sebelum terjadi pandemi. Komposisi kontributor berubah

dengan penurunan pada sektor rumah tangga menjadi 35% dan kenaikan pada sektor industri menjadi 44% (Gambar 16). Secara persentase, angka perubahan 2% mungkin tidak besar, namun secara penggunaan riil nilainya besar karena berasal dari sektor industri.



Gambar 26. Dinamika komposisi GRK bangkitan listrik Kota Surakarta pada tahun 2013 dan 2021

GRK bangkitan listrik menunjukkan tren meningkat pada periode 2013-2021 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 himbauan, 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

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.

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 saat ini telah berupaya mengkonversi bahan bakar pada pembangkit listriknya. Jenis bahan bakar terbarukan mulai dimanfaatkan meski dengan tingkat bauran yang masih relatif kecil. Upaya ini tentu menjadi hal yang positif dalam rangka mitigasi GRK menguungat nilai emisi dan resiko lingkungan bahan bakar terbarukan relatif lebih rendah dibandingkan batubara.

(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 diperhitungan dalam kategori penggunaan energi adalah emisi yang tergolong pada kelompok *combustive emission*.

Data bahan bakar industri diperoleh dari Dinas Tenaga Kerja dan Perindustrian (2021). 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, solar, LPG, CNG dan batubara. Berikut adalah data konsumsi bahan bakar (energi) industri Kota Surakarta.

Tabel 18 Konsumsi bahan bakar sektor industri Kota Surakarta 2020

No	Jenis bahan bakar	Konsumsi
		ton/tahun*
1	Gasoline*	248
2	Diesel*	56081
3	Minyak tanah*	360
4	LPG	41,112
5	CNG	87,65
6	Batubara	3,19
7	Kayu Bakar	69,84
8	Arang	2,4

Sumber : *Disnakerperin (2021), 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 19 Net calorific value (NCV) dan faktor emisi aktivitas industri

No	Jenis Bahan Bakar	NCV*	Faktor emisi (kg/TJ)			Keterangan
			CO ₂	CH ₄	N ₂ 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	Minyak tanah	0,0431	71900	3	0,6	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category residential
4	LPG	46,7	63100	1	0,1	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



						Stationary Combustion category manufacture industry
5	CNG	50	63100	1	0,1	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category manufacture industry
6	Batubara	29,3	94600	10	1,5	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category manufacture industry
7	Kayu bakar	15	112000	300	4	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category residential
8	Arang	15	112000	300	4	IPCC (2006) Vol 2 Chapter 2 Stationary Combustion category residential

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 penjualan bahan bakar untuk sektor industri tahun 2020 dan faktor emisi, maka dapat diperhitungkan beban emisi GRK sektor industri Kota Surakarta tahun 2022.

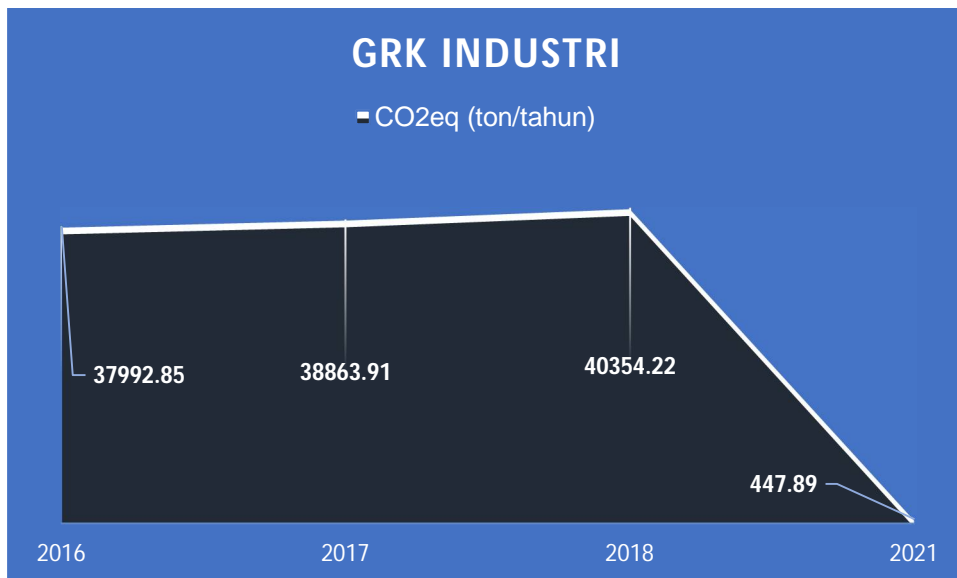
Tabel 20 Emisi aktivitas industri Kota Surakarta tahun 2022

Jenis bahan bakar	Emisi (ton/th)			CO ₂ eq (ton/tahun)
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Gasoline	0,60	0,00	0,00	0,60
Diesel	160,82	0,01	0,00	161,36

LPG	0,12	0,00	0,00	0,12
CNG	276,55	0,00	0,00	276,77
Batubara	8,84	0,00	0,00	8,91
Minyak tanah	0,0011156	0,00	0,00	0,001119
Kayu Bakar	0,12	0,00	0,00	0,13
Arang	0,00	0,00	0,00	0,004303
TOTAL EMISI	447,05	0,01	0,00	447,89

Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2021), beberapa parameter memiliki nilai sangat kecil sehingga tertulis 0,00

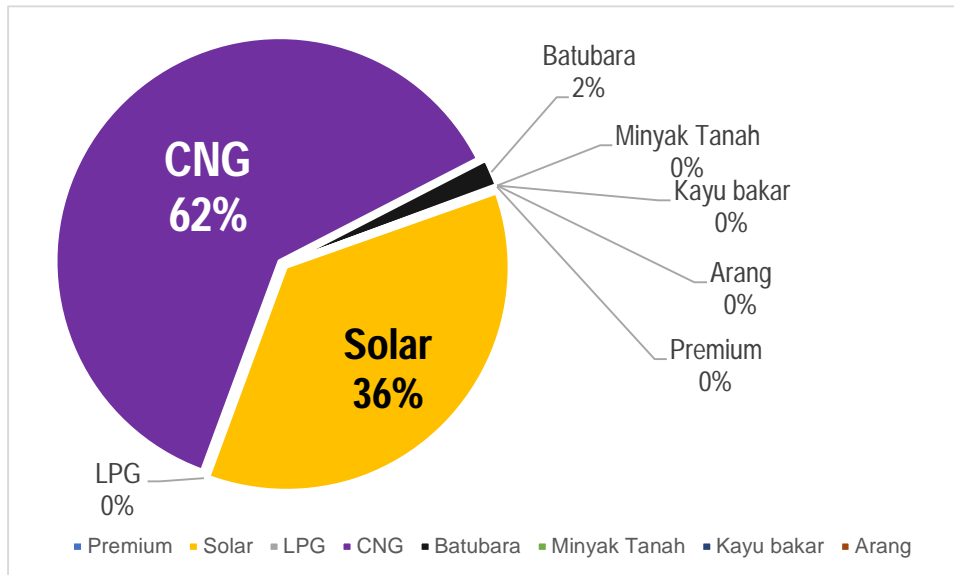
Emisi GRK yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar sektor industri adalah 447,89 tonCO₂eq/tahun. Nilai tersebut terutama dari pemakaian CNG dan bahan bakar cair solar (diesel). Hasil hitungan tersebut hanya dari aktivitas pada industri menengah dan besar.



Gambar 27. Dinamika emisi GRK konsumsi energi sektor industri pada periode 2016-2021 di Kota Surakarta

Semestinya pertumbuhan emisi industri cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya permintaan produk akibat pertumbuhan populasi. Kondisi tersebut teramati pada periode 2016-2018 namun menurun secara drastis pada 2020. Asumsi utama kondisi tersebut adalah keterbatasan data aktivitas pada konsumsi energi sektor industri pada tahun terakhir. Probabilitas lain adalah penurunan aktivitas industri secara signifikan akibat pembatasan aktivitas pada masa pandemi. Nilai emisi industri yang didapat tergolong sangat rendah meskipun secara relatif Surakarta tidak memiliki banyak industri skala besar pada wilayah

administratif. Meskipun demikian, jenis industri besar dan menengah yang ada seperti tekstil dan makanan merupakan tipikal industri dengan konsumsi energi fosil besar serta belum sepenuhnya tergantikan dengan instrumen instrumen listrik.



Gambar 28. Kontribusi GRK industri berdasarkan jenis bahan bakar

Gas rumah kaca (GRK) sektor industri didominasi oleh dua sumber bahan bakar yaitu compressed natural gas (CNG) dan solar. Hasil tersebut cukup positif mempertimbangkan CNG sebagai bahan bakar yang rendah emisi dengan nilai faktor emisi setara dengan LPG. Solar masih menjadi sumber energi penting dalam industri Kota Surakarta yang menyumbang 36% GRK. Selain itu masih terdapat pemanfaatan jenis bahan bakar padat seperti batubara (2%), arang dan kayu bakar dengan nilai emisi per unit lebih besar dibandingkan jenis gas dan padat.

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 dari penggunaan bahan bakar. Survey dengan metode

pengisian kuisioner 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 menghasilkan emisi sebesar 0,161 tonCO₂eq/tahun.

c. Industrial Process and Product Uses (IPPU)

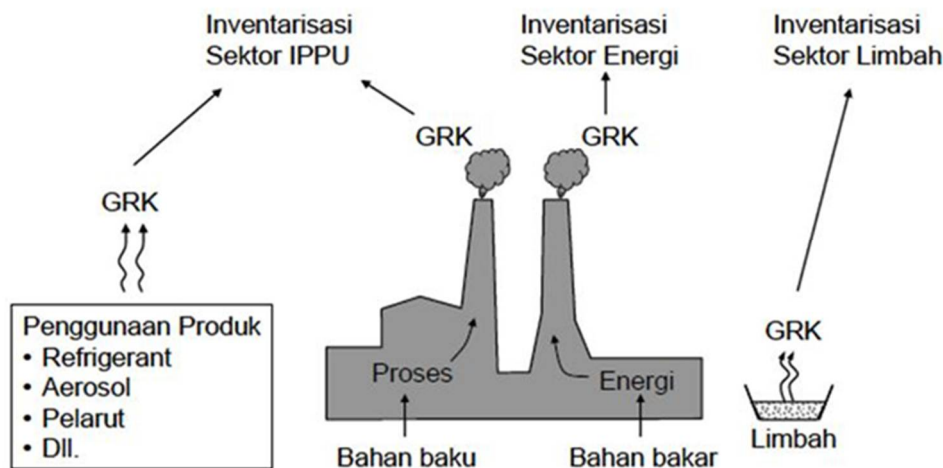
Beban emisi dari kategori proses industri dan penggunaan produk atau IPPU (industrial processes and product uses) membahas mengenai kegiatan kegiatan yang masuk dalam kelompok :

- 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 km² tidak menyediakan ruang luas bagi kebutuhan industri besar.

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.



Gambar 29. Penjelasan pengelompokan emisi GRK pada proses industri menurut kategori kunci IPCC (sumber : Kementerian Lingkungan Hidup, 2011).

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 2022 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.

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 21. Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori IPPU

No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	NO ₂	
1	Pelumas	956.08	0	0	956.08
2	Parafin Waxes	1426.06	0	0	1426.06
TOTAL EMISI		2382.14	0	0	2382.14

Sumber : hasil perhitungan data sekunder (2022)

Total GRK dari kluster IPPU sebesar **2382,14tonCO₂eq/tahun**. Nilai tersebut diperoleh dari data penggunaan pelumas industri menengah, parafin wax industri batik dan pelumas automotive. Nilai GRK IPPU mengalami peningkatan signifikan dibandingkan tahun sebelumnya (naik 67,04%) karena input automotive lubricants.

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).

Tabel 22. Data aktivitas konsumsi pelumas industri Kota Surakarta berdasarkan kelompok industri

No	Kelompok industri	Konsumsi (liter/tahun)	Konsumsi (ton/tahun)
1	Menengah (detail kegiatan tidak diketahui)	1198	1,12
2	Industri Batik	490	0,46
Total konsumsi pelumas		1688	1,58

Sumber : Disnakerperin (2021)

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 2020 industri menengah mengkonsumsi 1688 L pelumas atau setara dengan 1,58 ton. Nilai tersebut tentunya tergolong sangat 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 23. 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 ₂ /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 24. Estimasi emisi penggunaan pelumas industri Kota Surakarta tahun 2022

No	Kelompok industri	Emisi (tonCO ₂ /tahun)	CO ₂ eq (ton/tahun)
1	Menengah (detail kegiatan tidak diketahui)	0,67	0,67
2	Industri batik	0,27	0,27
TOTAL EMISI		0,94	0,94

Sumber : perhitungan data sekunder (2021)

Hasil perhitungan menunjukkan emisi dari penggunaan pelumas di Kota Surakarta memiliki nilai yang kecil yaitu 0,94 tonCO₂/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 mengakibatkan penggunaan material tersebut cukup besar di Surakarta. Kondisi tersebut selaras dengan jumlah industri batik sebagai sektor 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 CO₂ dalam C.

Tabel 25. 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 ₂ /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 26. Estimasi emisi penggunaan parafin/wax industri batik Kota Surakarta tahun 2022

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

Sumber : perhitungan data sekunder (2021)

Total emisi yang dihasilkan oleh penggunaan parafin dan wax pada proses produksi batik di Kota Surakarta mencapai 1426,06 tonCO₂eq/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 selama bulan Agustus 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 CO₂) dengan pendekatan Tier I. Faktor emisi telah tersedia pada dokumen pedoman yang sama dengan detail sebagai berikut

Tabel 27. 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

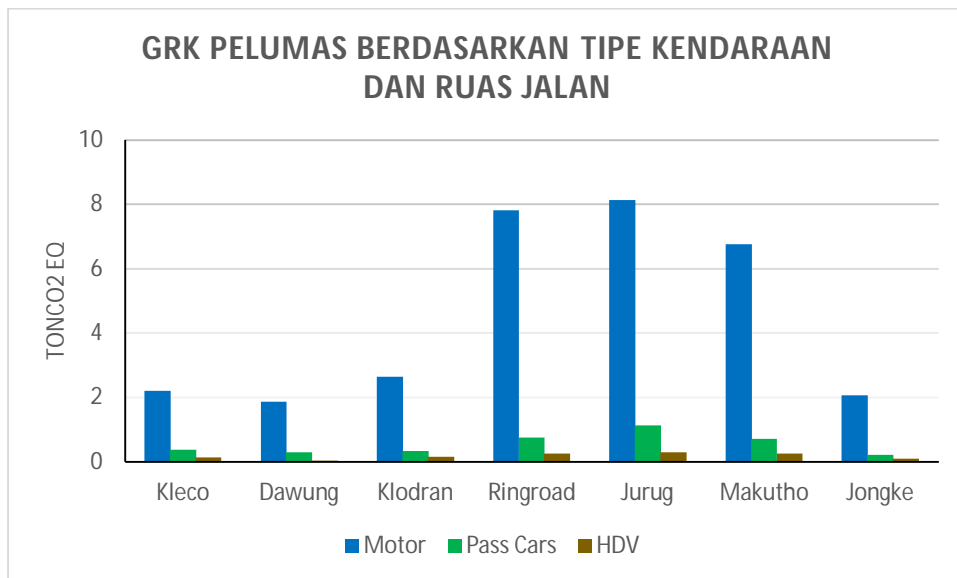
Menggunakan ketersediaan data lalu lintas harian rata rata dan faktor emisi diperoleh nilai GRK pelumas kendaraan bermotor Kota Surakarta sebagai berikut

Tabel 28. Hasil perhitungan GRK pelumas kendaraan bermotor Kota Surakarta tahun 2022

No	Jalan pemantauan	Emisi tahunan (tonCO ₂ eq/tahun)
1	Slamet Riyadi	188.32
2	Yos Sudarso	91.80
3	Adi Sumarmo	46.60
4	Ringroad	129.43
5	Sutami+Sutarto	226.51
6	Adi Sucipto	160.03
7	Rajiman 2 way	112.44
Total GRK pelumas kendaraan bermotor		955,14

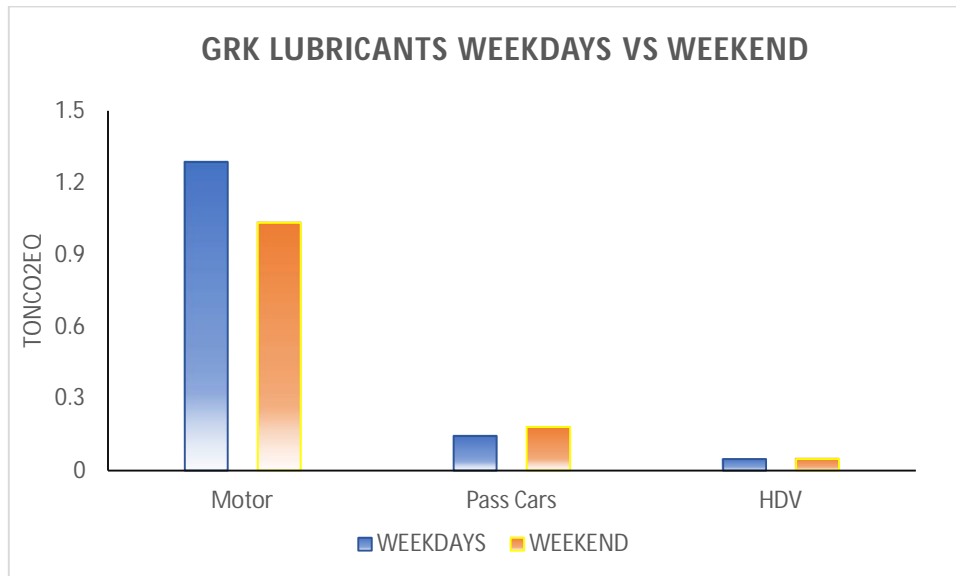
Sumber : perhitungan data primer (2022)

Total GRK pelumas kendaraan bermotor mencapai 955,14 tonCO₂eq. Nilai tersebut baru berasal dari 7 luas jalan yang dianggap sebagai pintu masuk kota dan tersedia data LHR. Nilai GRK pelumas pada masing masing jalan ditentukan oleh jumlah dan jenis kendaraan. Nilai tertinggi teridentifikasi pada kombinasi Jl Sutami dan Sutarto dan terendah pada Jl Adi Sumarmo.



Gambar 30. Kontribusi GRK pelumas berdasarkan jenis kendaraan

Sepeda motor menjadi jenis kendaraan dengan kontribusi tertinggi pada GRK pelumas kendaraan diikuti oleh mobil. Kondisi ini bersumber dari jumlah yang lebih besar dan mendominasi tipe lain karena preferensi terhadap moda pribadi sangat tinggi. Hal ini sekaligus sebagai pedoman dalam upaya mitigasi GRK untuk lebih fokus pada pengurangan penggunaan moda pribadi.



Gambar 31. Komposisi GRK pelumas kendaraan pada weekdays dan weekend di Kota Surakarta.

Kondisi hari kerja (weekdays) dan akhir pekan (weekend) memiliki determinasi besar terhadap GRK yang dihasilkan dari kendaraan, termasuk pelumas. Kota Surakarta adalah wilayah pusat pelayanan bagi kawasan hinterland dan berada pada jalur lintas (transit). Aktivitas komuter menjadi penyumbang utama masalah lingkungan terkait dengan transportasi karena jumlah mobilitas masif terutama pada weekdays.

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 meenjadi 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 CO₂

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 29. Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori agrikultur, kehutanan dan penggunaan lahan

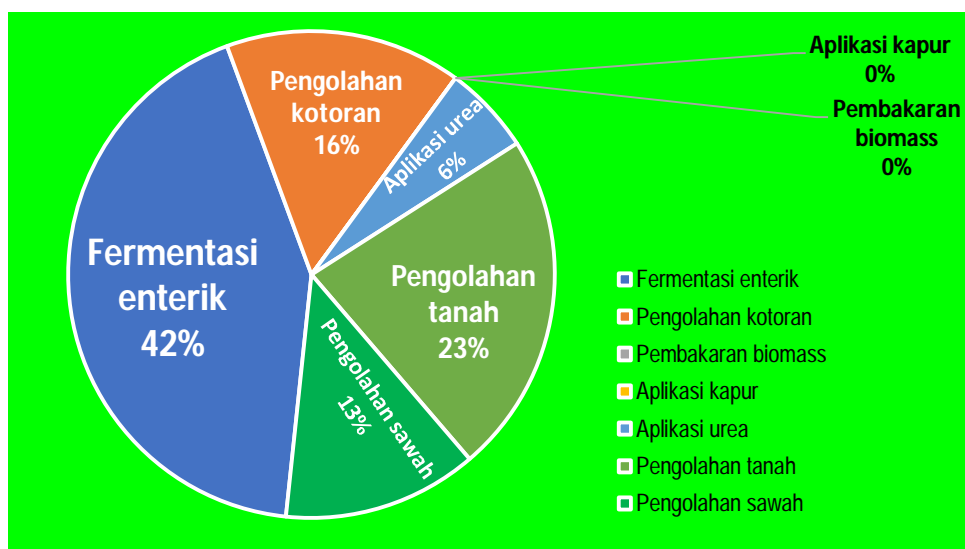
No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	NO ₂	
1	Peternakan				
a	Fermentasi enterik	0.00	20.59	0.00	432.31
b	Pengolahan kotoran	0.00	1.11	0.44	159.03
2	Pertanian				
a	Pembakaran biomass	0.00	0.00	0.00	0.00
b	Aplikasi kapur	4.05	0.00	0.00	4.05
c	Aplikasi urea	59.85	0.00	0.00	59.85
d	Pengolahan tanah	0.00	0.00	0.74	230.33
e	Pengolahan sawah	0.00	6.24	0.00	131.08
3	Penggunaan lahan	59657.00	0.00	0.00	59657.00
TOTAL EMISI		59720.90	27.94	1.18	60673.65

Sumber : perhitungan data sekunder (2021)

Total emisi GRK kategori AFOLU mencapai **60673,65** CO₂eq/tahun. Nilai tersebut mengalami penurunan 0,17% dibandingkan tahun sebelumnya. Penurunan didorong oleh berkurangnya lahan pertanian Surakarta. Saat ini Kota Surakarta telah menghapus status sawah lestari yang memudahkan pada 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.



Gambar 32. Komposisi kontribusi GRK AFOLU Kota Surakarta hasil inventarisasi tahun 2022

Kontribusi GRK kluster AFOLU tanpa alih fungsi lahan didominasi oleh kegiatan fermentasi enterik pada kegiatan peternakan terutama pada jenis jenis hewan ruminansia. Nilainya mencapai 42% dari keseluruhan emisi. Fermentasi enterik berkombinasi dengan GRK pengolahan kotoran menjadikan aktivitas peternakan dominan dengan menyumbang 58% GRK kluster AFOLU.

Pengolahan tanah (23%) dan sawah (13%) menjadi sumber GRK tertinggi berikutnya di kluster AFOLU. Kondisi tersebut terjadi karena keterbatasan lahan pertanian di Kota Surakarta yang mendorong pemilik lahan lebih intens mengolah lahan untuk mendapatkan hasil optimal. Hal tersebut diperkuat dengan penggunaan pupuk urea yang menghasilkan 6% GRK sektor AFOLU. Secara riil, lahan pertanian masih ada dengan luasan kecil dan kecenderungan untuk terus mengalami penurunan menjadi fungsi lahan lainnya dari tahun ke tahun.

Kota Surakarta menghadapi krisis fungsi ekosistem vegetasi. Alih fungsi lahan yang tinggi dan keterbatasan lahan di wilayah administratif 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) 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 CH₄ 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).

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

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

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

Dengan

Elent : Emisi fermentasi enterik (ton/year)

Elwas : Emisi pengelolaan kotoran (ton/year)

Elt : Total livestock emission (ton/year)

$\sum \text{pop(ekor)}_i$: Jumlah keseluruhan ternak (ekor)

$\sum \text{pop(year)}_i$: 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 30. Data aktivitas peternakan di Kota Surakarta

No	Jenis ternak budidaya	Jumlah (ekor)	Umur rata-rata (hari) ¹	Populasi tahunan (ekor)
1	Sapi Potong	360		360
2	Sapi Perah	10		10
3	Kerbau	13		13
4	Kambing	207		207
5	Domba	164		164
6	Babi	0		0
7	Kuda	27		27
8	Ayam Buras	24627	180	12145
9	Ayam Pedaging	0	35	0
10	Ayam petelur	365	600	600
11	Bebek/itik	405	600	666
Total peternakan		26178		14192

Sumber : Dinas Pertanian, Ketahanan Pangan dan Peternakan dan Perikanan (2021)

singifikan karena bersumber dari aktivitas konsisten dan terjadi pada seluruh individu ruminansia. 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 peternakan mengaplikasikan faktor emisi sebagai berikut

Tabel 31. Faktor emisi metana dari fermentasi enterik dan pengolahan kotoran pada sektor peternakan

No	Parameter emisi	Nilai Faktor emisi	Satuan	Keterangan
Fermentasi enterik				
1	Sapi potong	47	kgCH ₄ /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 ₄ /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

Tabel 32. 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 33. 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 34. Hasil inventarisasi gas rumah kaca sektor peternakan

No	Proses	Emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	Fermentasi enterik	0.00	20.59	0.00	432.31
2	Pengolahan Kotoran	0.00	1.11	0.44	159.03
TOTAL EMISI		0,00	21,70	0,44	591,33

Sumber : perhitungan data sekunder (2022)

Total GRK sektor peternakan pada tahun 2022 setara dengan 591,33 tonCO₂eq/tahun dengan mayoritas adalah kontribusi metana. Sub sumber utama pada GRK peternakan adalah fermentasi enterik ruminansia yang mencapai 432,31 tonCO₂eq/tahun. Nilai GRK pengolahan kotoran menjadi cukup besar karena waktu 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 (N₂O) sebesar 0,44 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 26,36% dibandingkan tahun sebelumnya meskipun jumlah ternak meningkat. Hal ini terjadi karena penambahan jumlah ternak berupa kelompok unggas. Kelompok tersebut tidak menghasilkan emisi tambahan dari fermentasi enterik. Pada sisi lain, jumlah ternak ruminansia mengalami penurunan.

(2) 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 CO₂ mendominasi emisinya. Namun, beberapa lainnya hanya menghasilkan emisi CH₄ dan NO₂.

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.

Berikut ini disajikan hasil perhitungan atau estimasi emisi sektor pertanian secara umum di Kota Surakarta.

Tabel 35. Estimasi emisi sektor pertanian di Kota Surakarta tahun 2022

No	Kategori	Emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	Pembakaran biomassa	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Pemakaian kapur	4.05	0.00	0.00	4.05
3	Aplikasi urea	59.85	0.00	0.00	59.85
4	Pengolahan tanah				
a	N ₂ O langsung	0.00	0.00	0.73	226.30
b	N ₂ O tidak langsung	0.00	0.00	0.01	4.03
5	Pengolahan sawah	0.00	6.24	0.00	131.08
TOTAL EMISI		63.90	6.24	0.74	425.31

Sumber : perhitungan data sekunder (2022)

Total GRK dari sektor pertanian di Kota Surakarta mencapai 425,31 tonCO₂eq/tahun. Estimasi emisi pertanian secara keseluruhan memunculkan nilai emisi karbondioksida 63,90 ton/tahun yang dikontribusikan oleh aplikasi urea dan pemakaian kapur. Nilai emisi penggunaan urea meningkat meski tidak signifikan dibandingkan tahun sebelumnya. Nilai emisi metana sebesar 6,24 ton/tahun hanya dihasilkan dari kegiatan pengolahan sawah. Nilai emisi nitrogen dioksida sebesar 0,74 ton/tahun hanya dihasilkan dari pengolahan tanah, berupa emisi N₂O secara langsung dan tidak langsung. Perhitungan emisi tersebut menunjukkan karakter khas pada masing-masing emisi yang dihasilkan oleh kegiatan pertanian spesifik.

Nilai GRK pertanian mengalami sedikit peningkatan dibandingkan tahun sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan luasan lahan tidak serta merta menurunkan GRK. Faktor lain seperti intensitas penggunaan pupuk turut berpengaruh. Pada kasus hasil GRK tahun 2022, penggunaan pupuk mengalami peningkatan ditambah aplikasi dolomit. Tujuan peningkatan kedua bahan tersebut kemungkinan sebagai upaya mengoptimalkan hasil pertanian dari lahan yang semakin menyempit.

Karakter khas pada setiap aktivitas spesifik tentu saja dihasilkan dari data aktivitas yang unik dan sesuai kondisi lokal. Faktor emisi yang digunakan merupakan hasil formulasi baru dari data-data tersebut sehingga

perhitungan emisi pertanian dapat dikatakan memenuhi metode Tier III. Berikut adalah detail pada setiap aktivitas spesifik tersebut.

a) Pembakaran biomassa dan pemakaian dolomit

Informasi yang diperoleh dari kuisisioner data instansi pemerintah (Dinas Pertanian, Ketahanan Pangan dan Peternakan dan Perikanan) maupun pengamatan secara langsung menghasilkan kesimpulan tidak terjadi pembakaran biomassa. Pembakaran biomassa yang dimaksud adalah terjadinya kebakaran tidak sengaja atau pembakaran disengaja pada lahan hutan ataupun sisa panen. Kota Surakarta tidak memiliki lahan hutan primer maupun sekunder sehingga tidak mungkin terjadi masalah kebakaran hutan.

Untuk sisa panen Kota Surakarta tidak diperlakukan dengan dibakar. Beberapa sisa panen kemudian terbuang terbuka untuk diangkut ke TPA Putri Cempo (open dumping) dan sisanya diolah menjadi produk sampingan berupa pupuk oleh masyarakat wilayah administrasi lain. Hal ini dimungkinkan karena letak lahan pertanian berada di kawasan perbatasan perkotaan Surakarta, memiliki interaksi tinggi dengan masyarakat kabupaten/kota lainnya.

Untuk pemakaian kapur (dolomit) pada lahan pertanian tersedia data kuantitatif dari instansi setempat. Nilai aplikasi dolomit pada lahan pertanian di Kota Surakarta mencapai 8,5 ton/tahun. Aplikasi tersebut menghasilkan GRK yang tidak terlampaui besar yaitu 4,05 tonCO₂eq/tahun.

b) Aplikasi urea

Pupuk urea merupakan jenis pupuk buatan yang diaplikasikan terutama oleh keseluruhan petani padi maupun tanaman budidaya lain, termasuk di Kota Surakarta. Fungsinya untuk pengolahan dan penyiapan lahan serta sebagai pendukung nutrisi bagi tanaman budidaya. Karena fungsinya yang menguntungkan bagi hasil panen, seringkali penggunaan pupuk ini tidak terkontrol dan berlebih lebihan.

Pada satu sisi, urea memang membantu petani mencapai hasil panen dan keuntungan ekonomi yang diinginkan. Namun, pada sisi lingkungan penggunaannya secara berlebih beresiko tinggi pada lingkungan, termasuk

munculnya beban emisi karbondioksida CO₂ yang relatif signifikan. Pada tanah, penggunaan pupuk berlebih akan menimbulkan kejenuhan hingga menurunkan produktivitas lahan pada penanaman jangka panjang. Data dari Dinas Peternakan dan Pertanian hanya menunjukkan penggunaan urea pada budidaya pada dengan dosis mencapai 275 kg/ha lahan sawah untuk luasan area tanam 114 ha. Urea tersebut hanya untuk pemupukan jenis tanaman padi.

Emisi GRK yang dihasilkan oleh penggunaan pupuk urea adalah karbondioksida (CO₂). Faktor emisi berdasarkan kandungan C pada pupuk urea yang menurut kalkulator GRK PAKLIM (data nasional) bernilai 0,2 ton C/ton. Berdasarkan faktor emisi tersebut dapat diperhitungkan beban emisi dari aplikasi pupuk urea sebagai berikut.

Tabel 36 Estimasi emisi pemakaian pupuk urea pada lahan pertanian

Sub aktivitas dalam Sektor pertanian	Beban emisi (tonCO₂/tahun)
Aplikasi pupuk urea	59,85
Total beban emisi aplikasi urea	59,85

Sumber : Perhitungan data sekunder (2022)

Hasil perhitungan emisi pemakaian urea menghasilkan GRK mencapai 59,85 tonCO₂eq/tahun. Nilai tersebut juga bermakna bahwa dari aplikasi urea lahan pertanian di Kota Surakarta selama satu tahun mampu menghasilkan emisi 0,53 tonCO₂/ha. Angka tersebut sangat kecil dan wajar jika mempertimbangkan luasan panen padi sebagai tanaman budidaya tunggal di Surakarta.

c) Pengolahan tanah

Aktivitas pengolahan lahan memunculkan emisi berupa NO₂ langsung dan tidak langsung. Sumber emisi berupa NO₂ langsung pada pengolahan tanah berasal dari aplikasi N yang ditambahkan ke tanah, pengolahan tanah itu sendiri dan kotoran ternak yang terbang di padang rumput. Sedangkan, untuk emisi NO₂ tidak langsung berasal dari : volatilisasi N pengolahan tanah dan dari leaching dan limpasan pengolahan tanah.

Data aktivitas untuk perhitungan NO₂ langsung adalah jumlah aplikasi pupuk kimia buatan dan organik serta luasan lahan pertanian dan hutan.

Sedangkan untuk emisi NO₂ tidak langsung, data aktivitasnya hanya jumlah aplikasi pupuk organik dan luasan lahan pertanian-hutan. Berikut ini adalah data aktivitas untuk perhitungan pengolahan lahan pertanian.

Tabel 37 Data aktivitas emisi pengolahan tanah di Kota Surakarta

Tanah diolah (selain sawah tergenang)		Sawah Tergenang		Area tanah pertanian dan padang rumput (Ha)	Area lahan hutan (ha)
Aplikasi pupuk N buatan (ton)	Aplikasi pupuk N organik (ton)	Aplikasi pupuk N buatan (ton)	Aplikasi pupuk N organik (ton)		
NO₂ langsung					
2,5	0	8,125	0	42,5	0
NO₂ tidak langsung					
2,5	0	8,125	0	42,5	0

Sumber : Dinas Pertanian, Ketahanan Pangan dan Peternakan dan Perikanan (2022)

Berdasarkan data penggunaan pupuk N tahunan sebesar 250 kg/ha, maka diperoleh nilai penggunaan berbasis luasan untuk tanah diolah selain sawah tergenang 2,5 ton/tahun (dengan luasan 10 ha). Untuk sawah tergenang yang memiliki luasan lebih besar nilainya meningkat menjadi 8,125 ton/tahun.

Faktor emisi yang dipergunakan akan berbeda untuk perhitungan beban emisi pengolahan lahan berupa NO₂ langsung dan tidak langsung. Hal ini mempertimbangkan sumber emisi yang menghasilkan masing masing variabel NO₂ tersebut berbeda. Berikut ini adalah faktor emisi untuk perhitungan NO₂ langsung dan tidak langsung dari pengolahan lahan.

Tabel 38. Faktor emisi yang digunakan untuk menghitung beban emisi NO₂ langsung dan NO₂ tidak langsung dari aktivitas pengolahan tanah.

NO₂ langsung pengolahan lahan		
Parameter	Nilai Koefisien faktor emisi	Satuan
N yang ditambahkan ke tanah selain sawah tergenang	0,01	Kg N ₂ O-n/kg N
N ditambahkan ke sawah tergenan	0,03	Kg N ₂ O-n/kg N
Emisi dari tanah pertanian dan padang rumput	16	Kg N ₂ O-n/ha
Emisi dari lahan hutan	16	Kg N ₂ O-n/ha
Emisi dari N yang ditambahkan dari pupuk kandang	0,02	Kg N ₂ O-n/kg N
Emisi dari N yang dilepaskan di padang rumput (kotoran ternak)	0,01	Kg N ₂ O-n/kg N
NO₂ tidak langsung pengolahan lahan		
N karena volatilisasi dan redeposisi	0,01	kg N ₂ O-N/ kg NH ₃ -N+ N ₂ O-N
N karena leaching dan limpasan	0,0075	Kg N ₂ O-n/kg N
Fraksi dari pupuk buatan yang mengalami volatilisasi	0,1	kg NH ₃ -N+ N ₂ O-N/ kg N
Fraksi dari pupuk organik yang mengalami volatilisasi	0,2	kg NH ₃ -N+ N ₂ O-N/ kg N
Fraksi N yang ditambahkan ke tanah terolah dimana leaching terjadi	0,3	kg N/kg N tambahan

Sumber : IPCC (2006), Kementerian Lingkungan Hidup (2011) dikompilasikan dalam kalkulator GRK GIZ PAKLIM

Menggunakan faktor emisi tersebut di atas (Tabel 37), akan dapat diperhitungkan nilai beban emisi NO₂ langsung dan NO₂ tidak langsung dari pengolahan lahan sebagai berikut.

Tabel 39. Hasil perhitungan beban emisi aktivitas pertanian, sub aktivitas pengolahan tanah di Kota Surakarta

Emisi N ₂ O langsung (ton/tahun)		Emisi N ₂ O tidak langsung (ton/tahun)	
Sumber emisi	Nilai beban emisi	Sumber emisi	Nilai beban emisi
N yang ditambahkan ke tanah	0,05	N ₂ O dari volatilisasi N dari pengolahan lahan	0,004
Pengolahan tanah	0,68	N ₂ O dari leaching dan limpasan dari pengelolaan tanah	0,009
Kotoran ternak yang dibuang ke padang rumput	0		
Total beban emisi N ₂ O langsung	0,73	Total beban emisi N ₂ O tidak langsung	0,013
Total emisi pengolahan tanah (Emisi N₂O langsung+Emisi N₂O tidak langsung)			0,74
Konversi CO₂eq (ton/tahun)			230,33

Sumber : Perhitungan data sekunder (2021)

Emisi nitrogen dioksida langsung hanya dihasilkan dari dua aktivitas yaitu N yang ditambahkan ke tanah dan pengolahan tanah. Tidak terdapat emisi dari kotoran ternak yang dibuang ke padang rumput karena memang tidak ada kegiatan beternak atau melepaskan liar ternak di kawasan padang rumput. Selain itu, kawasan padang rumput merupakan vegetasi yang tidak tersedia di wilayah administratif Kota Surakarta. Total emisi N₂O langsung adalah 0,73 ton/tahun yang lebih besar disumbangkan oleh aktivitas pengolahan tanah (0,68 ton/tahun). Penambahan N ke tanah cukup kecil yang menunjukkan penggunaan pupuk pada lahan pertanian cukup terbatas. Hal ini juga berkaitan dengan sektor pertanian yang memang bukan menjadi pencaharian utama maupun sektor non prioritas dalam menggerakkan roda ekonomi di Kota Surakarta.

Emisi nitrogen dioksida tidak langsung di Kota Surakarta mencapai 0,013 ton/tahun, lebih rendah dari emisi langsung. Emisi tersebut terutama dikontribusikan oleh N₂O dari leaching dan limpasan lahan pertanian (0,009

ton/tahun). Berdasarkan perhitungan emisi langsung maupun tidak langsung, diperoleh nilai emisi pengolahan tanah sebesar 0,74 tonN₂O/tahun atau setara dengan 230,33 tonCO₂eq/tahun. Nilai tersebut sangat kecil mengingat luasan lahan pertanian yang juga terbatas.

d) Pengolahan sawah

Sesuai dengan pengkategorian lahan oleh IPCC, emisi pengolahan lahan Kota Surakarta tergolong kelompok *Cropland* yaitu lahan untuk kepentingan tanaman pangan, termasuk sawah dan lahan lainnya yang memiliki struktur vegetasi dibawah ambang batas lahan hutan. Emisi metana pada pengolahan sawah padi didorong oleh dekomposisi bahan organik secara anaerobik.

Emisi dari sub aktivitas pengolahan sawah secara umum dihasilkan oleh pengolahan sawah untuk kepentingan penanaman padi. Emisi pada penanaman padi umumnya menjadi lebih signifikan ketika lahan tersebut terus tergenang oleh air. Seperti halnya emisi berkaitan dengan aktivitas pertanian lain di Kota Surakarta, emisi pengolahan sawah diperkirakan tidak bernilai signifikan akibat terbatasnya luasan lahan sawah. Berikut adalah data aktivitas terkait pengolahan sawah di Kota Surakarta.

Tabel 40 Data aktivitas pertanian Kota Surakarta

No	Parameter data aktivitas	Tipe persawahan				
		Non irigasi	Irigasi tergenang terus menerus	Irigasi intermitten	Irigasi, multiple aerasi	Tadah hujan, pengairan alami
1	Musim tanam pertahun (kali)*	0	0	2-3 kali	0	1-2 kali
2	Area tanaman padi (ha)**	0	0	97,5 ha	0	16,5 ha
3	Lama masa tanam (hari)*	0	0	120 hari	0	100-120 hari
4	Laju aplikasi bahan organik (ton/ha)***					
	a. Jerami < 30 hari	0	0	0	0	0
	b. Jerami > 30 hari	0	0	2,1 ton/ha	0	2,1 ton/ha

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



c. Kompos	0	0	0,5 ton/ha	0	0,5 ton/ha
d. Pupuk kandang	0	0	0,5 ton/ha	0	0,5 ton/ha
e. Pupuk hijau	0	0	0	0	0

Sumber : Dinas Pertanian, Ketahanan Pangan dan Peternakan dan Perikanan (2022)

Data sekunder dari dinas terkait menunjukkan bahwa terdapat dua jenis sawah padi di Kota Surakarta yaitu sawah intermitten dan sawah tadah hujan yang mengandalkan air hujan sebagai sumber utama pengairan. Total luasan sawah pada tahun 2021 adalah 42,5 ha. Sawah intermitten memiliki luasan lebih besar daripada sawah tadah hujan.

Berdasarkan periode panen, sawah intermitten memiliki periodisasi yang hampir sama yaitu antara 2-3 kali tanam/tahun sedangkan tadah hujan 1-2 kali tanam/tahun. Sawah intermitten memiliki masa tanam 120 hari. Berdasarkan informasi masa hari tanam, maka pada sawah *intermitten* tanpa jeda penanaman sepanjang tahun. Sawah tadah hujan memiliki rentang masa tanam 100-120 hari. Dengan periodisasi maksimal 2 kali maka terdapat masa jeda penanaman 4-8 bulan setiap tahunnya. Lama penggenangan pada sawah berpengaruh terhadap nilai GRK (metana) dihasilkan. Semakin lama penggenangan, maka metana yang dihasilkan akan semakin besar. Laju aplikasi organik hanya terjadi pada sawah intermitten dan tadah hujan melalui penambahan jerami >30 hari, kompos dan pupuk kandang dengan total 3,1 ton/ha untuk masing masing sawah tersebut.

Perhitungan pada aktivitas pengolahan sawah lebih kompleks karena selain melibatkan penggunaan faktor emisi, juga terdapat koefisien konversi dan koefisien regime kondisi persawahan.

Tabel 41 Koefisien pendukung perhitungan beban emisi aktivitas pengolahan sawah

Koefisien regime perairan sawah						
Non irigasi	Irigasi tergenang terus menerus	Irigasi intermitten-single aerasi	Irigasi intermitten-aerasi multiple	Tadah hujan	SF before cultivation period	SF Soil
0	1	0,46	0,52	0,27	1	0,29

Faktor konversi koefisien organik				
Jerami < 30 hari	Jerami > 30 hari	Kompos	Pupuk kandang	Pupuk hijau
1	0,29	0,05	0,14	0,5

Secara umum, perhitungan beban emisi sawah memiliki *base line emission* factor yaitu sebesar 1,61 kgCH₄/ha/hari. Adanya perbedaan lingkungan dasar pada penanaman serta bahan-bahan pendukung yang ditambahkan pada periode pengolahan sawah membuat faktor emisi tersebut disesuaikan dengan memperhentikan perbedaan kondisi dan metode, dengan tetap memasukkan nilai baseline faktor emisi. Beberapa kondisi yang menentukan perubahan atau penyesuaian faktor emisi antara lain regime perairan dan metode pemupukan sawah. Berikut ini adalah nilai faktor emisi pengolahan sawah setelah dilakukan penyesuaian tersebut.

Tabel 42. Faktor emisi pengolahan sawah yang telah dikoreksi

Jenis/Tipe pengairan sawah padi	Faktor emisi (kgCH ₄ /ha/hari)
Sawah non irigasi	0
Sawah irigasi tergenang terus menerus	0,282
Sawah irigasi intermitten-single aerasi	0,122
Sawah irigasi intermitten multiple aerasi	0,138
Sawah tadah hujan	0,072

Menggunakan faktor emisi yang telah dikoreksi tersebut, dapat diperhitungan beban emisi metana (CH₄) pengolahan sawah dengan rumusan sebagai berikut :

EmisiCH₄ Pengolahan Sawah

$$= (\text{Jumlah musim tanam} \times \text{Area sawah padi} \times \text{Masa tanam} \times \text{faktor Emisi}) / 1000$$

Dengan jumlah musim tanam (kali/tahun), area sawah padi (Ha), masa tanam (hari) dan faktor emisi (kgCH₄/ha/hari). Disebut pula sebagai emisi CH₄ regime pertumbuhan. Berikut ini adalah perhitungan beban emisi dari aktivitas pengolahan sawah di Kota Surakarta

Tabel 43 Hasil perhitungan beban emisi aktivitas pertanian, sub aktivitas pengolahan sawah di Kota Surakarta

Jenis/Tipe pengairan sawah padi	Beban emisi (tonCH ₄ /tahun)
Sawah non irigasi	0,00
Sawah irigasi tergenang terus menerus	0,00
Sawah irigasi intermitten-single aerasi	5,88
Sawah irigasi intermitten multiple aerasi	0,00
Sawah tadah hujan	0,36
TOTAL EMISI	6,24

Sumber : perhitungan data sekunder (2021)

Emisi dari aktivitas pengolahan sawah Kota Surakarta mencapai 6,24 tonCH₄/tahun atau setara dengan 131,08 tonCO₂eq/tahun. Nilai tersebut didominasi oleh emisi sawah intermitten sebagai tipe sawah dengan luasan terbesar di Kota Surakarta. Pada aktivitas pengolahan sawah, lama penggenangan akan mempengaruhi pada nilai metana yang dihasilkan.

Isu utama pada sektor pertanian khususnya penyediaan lahan sawah di Kota Surakarta adalah penghapusan status sawah lestari. Penghapusan tersebut akan memudahkan konversi sawah menjadi peruntukkan antropogenik lain seperti perumahan, bisnis maupun jasa. Dampak dari kondisi dapat mengarah dua sisi. Pertama adalah penurunan signifikan emisi GRK pertanian terutama dari pengolahan sawah, penggunaan pupuk maupun potensi pembakaran biomassa. Dampak yang kedua bersifat secara tidak langsung adalah peningkatan emisi GRK akibat alih guna lahan menjadi lahan lahan terbangun. Kehilangan persawahan sama artinya dengan berkurangnya ruang terbuka hijau (RTH) atau vegetasi dengan kemampuan serapan karbonnya sekesil apapun nilainya.

(3) 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.

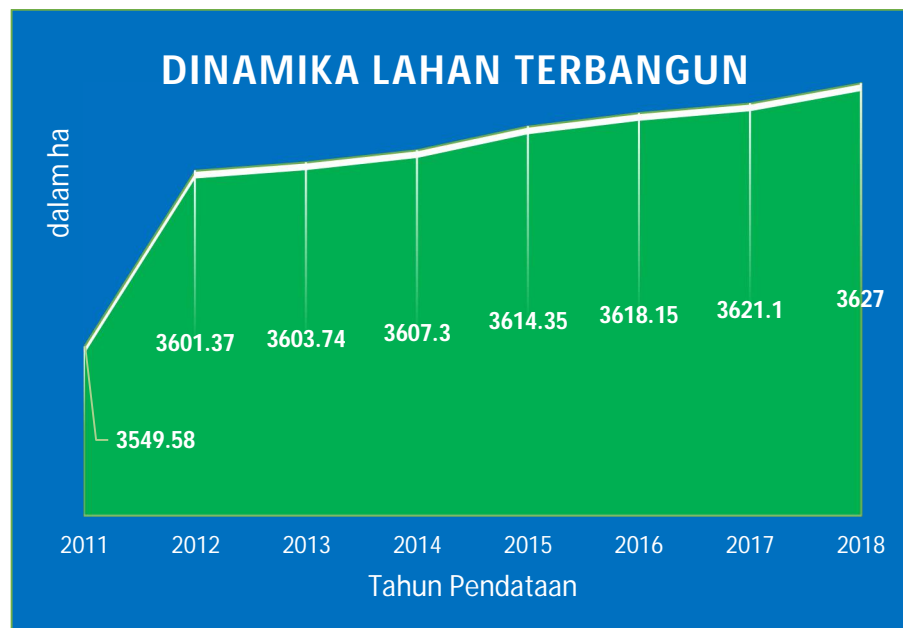
Kota Surakarta berkembang menjadi sebuah kota metropolitan modern diiringi oleh alih fungsi lahan, terutama lahan terbuka menjadi lahan untuk kepentingan antropogenik. Beberapa tipe penggunaan lahan yang dominan antara lain adalah pemukiman, perdagangan, jasa dan pariwisata. Secara umum, ditinjau dari 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)

Tabel 44. Penggunaan lahan Kota Surakarta periode 2011-2018

Kategori	Tahun							
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Lahan terbangun	3549,58	3601,37	3603,74	3607,3	3614,35	3618,15	3621,1	3627
Sawah	101,95	99,46	96,96	95,97	95,97	95,36	94,74	86,63
Pertanian lahan kering	117,46	110,74	109,28	108,1	102,04	98,45	96,58	96,58
Lahan terbuka	262,33	253,95	253,95	250,63	250,66	249,81	249,25	249,25

Sumber : BPS (2019)

Luasan penggunaan lahan pada tabel 39 menunjukkan dominasi peruntukkan lahan terbangun di Kota Surakarta. Luasan lahan terbangun tampak terus mengalami peningkatan pada periode 2011-2018 yang diikuti oleh penurunan lahan terbuka, terutama pada pertanian lahan kering. Tabel perubahan luasan peruntukan lahan juga memperlihatkan upaya pemerintah Kota Surakarta untuk mempertahankan ketersediaan lahan terbuka, khususnya yang berfungsi untuk publik.



Gambar 34. Dinamika lahan terbangun Kota Surakarta 2011-2018

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.

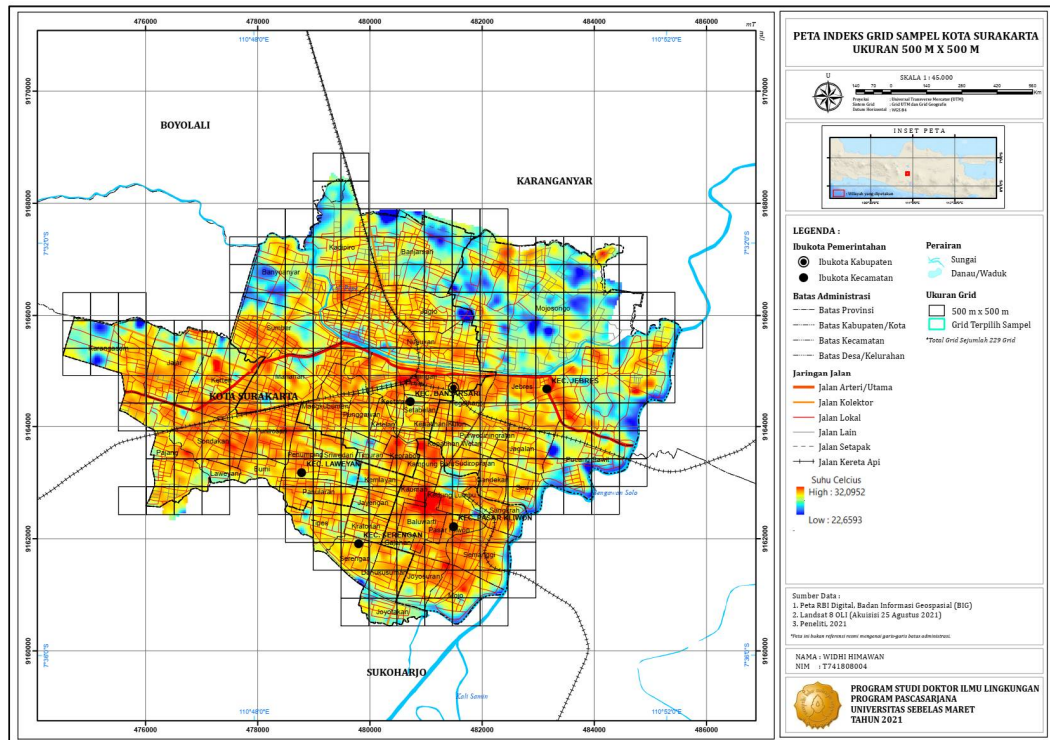
Tabel 45. Estimasi serapan karbon dan emisi penggunaan lahan Kota Surakarta

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

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 tonCO₂ 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.



**Gambar 35. Temperatur rata rata Kota Surakarta pada tahun 2021
(Sumber : penginderaan jarak jauh peta Landsat 8 dalam Himawan et al, 2021)**

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.

Kota Surakarta dapat dikatakan telah mengalami krisis ruang terbuka hijau (RTH). Ketersediaan RTH sangat terbatas terutama yang bersifat publik. Kondisi pada RTH privat tidak terlampaui 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 terlampaui. 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.

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 dominansi 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 dibahas 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.

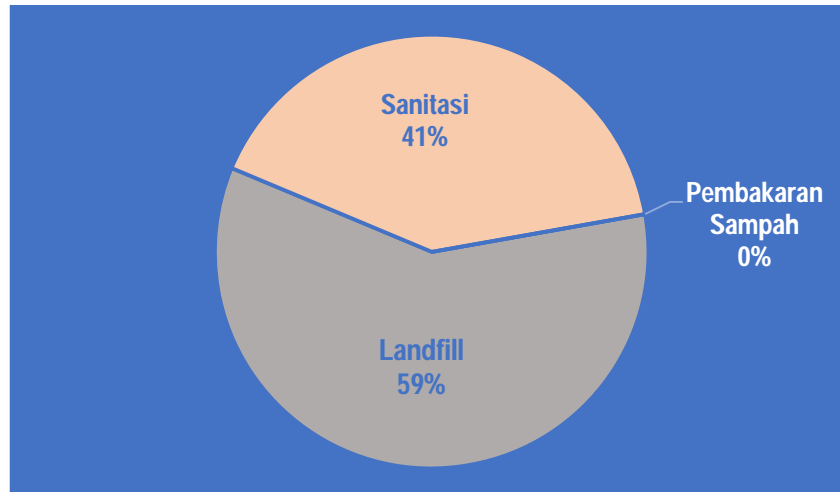
Tabel 46. Hasil inventarisasi gas rumah kaca kategori pengolahan limbah

No	Sub Kegiatan	Nilai emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq/tahun
		CO ₂	CH ₄	NO ₂	
1	Landfill	0.00	4477.98	0.00	94037.58
2	Sanitasi	0.00	2861.94	16.05	65075.36
3	Pembakaran Sampah	5.06	0.05	0.00	6.53
TOTAL EMISI		5.06	7339.97	16.05	159119.47

Sumber : perhitungan data sekunder (2021)

Emisi yang dihasilkan kategori pengolahan limbah di Kota Surakarta adalah 159119,47 CO₂eq/tahun. Nilai tersebut terutama dikontribusikan oleh landfill dan sanitasi. Pada parameter GRK untuk 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.



Gambar 36. Komposisi kontribusi GRK kluster Pengolahan Limbah Kota Surakarta hasil inventarisasi tahun 2022

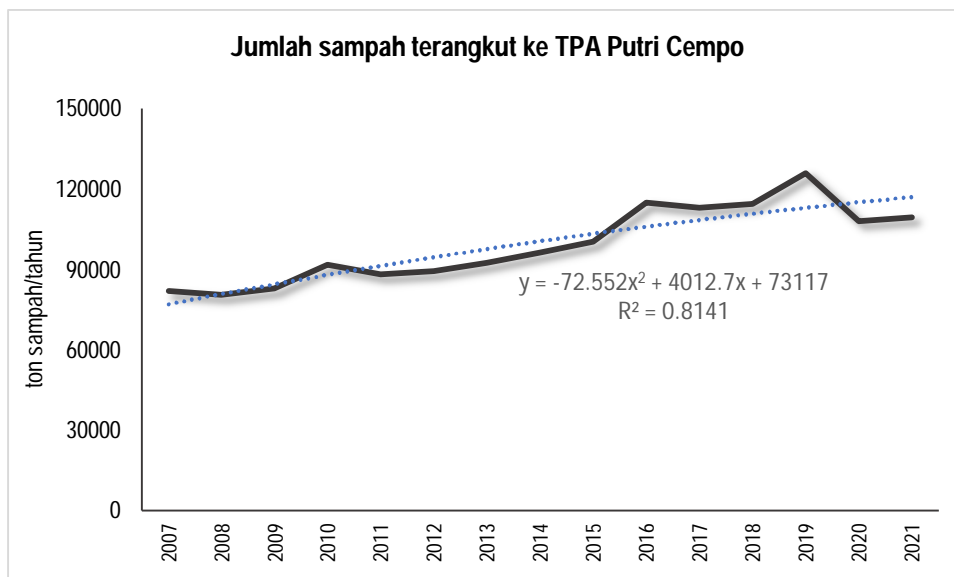
Satu hal negatif yang muncul dalam inventarisasi tahun ini adalah emisi karbondioksida (5,06 ton/tahun) sebagai hasil pembakaran sampah. Kota Surakarta sebenarnya telah memiliki regulasi yang melarang pembakaran sampah. Namun, perilaku ini masih muncul di masyarakat meski dalam intensitas yang cukup kecil dan terbatas.

Nilai GRK dari pengelolaan limbah mengalami peningkatan dibandingkan tahun sebelumnya. Nilai peningkatan tersebut mencapai 0,53%. Peningkatan berasal dari penambahan metan pada open dumping sampah TPA Putri Cempo dan sanitasi (penambahan populasi pengguna septic tank). Poin open dumping merupakan GRK dengan potensi berkurang pada masa mendatang oleh operasional PSEL yang melalui proses gasifikasi mengubah sampah menjadi energi listrik. Operasional tersebut paktis mengurangi emisi metana karena tumpukan sampah akan berkurang karena dimanfaatkan dalam PSEL.

(1) 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_4) yang bisa merusak atmosfer bumi.

Pertumbuhan penduduk yang semakin tinggi dan semakin bertambahnya konsumsi masyarakat serta aktivitas lainnya akan berdampak pada terjadinya penambahan volume sampah yang dihasilkan. Grafik di bawah 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.

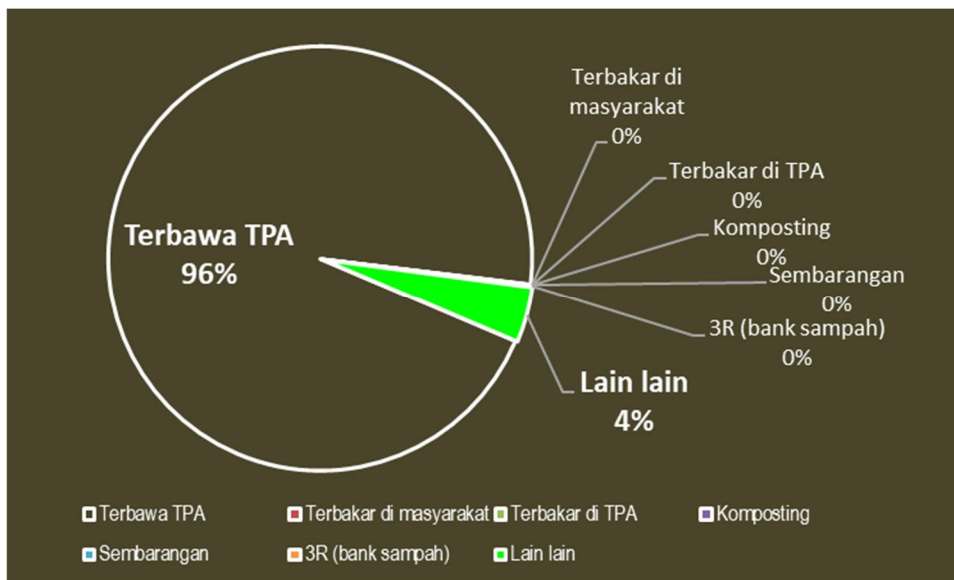


Gambar 37. Produksi sampah Kota Surakarta 2016-2021

Jumlah produksi sampah Kota Surakarta kembali mengalami peningkatan ketika kondisi pandemi membaik. Total produksi sampah 2021 meningkat 1,22% dibanding masa pandemi. Kondisi ini pun dengan catatan aktivitas antropogenik belum sepenuhnya normal pada 2021. Peningkatan tersebut dimungkinkan oleh operasional kembali fasilitas perdagangan, perkantoran

dan jasa meski belum dalam kapasitas penuh. Hal ini menunjukkan bahwa kendali dinamika sampah adalah pada aktivitas manusia, konsumsi dan pola perilakunya.

Evaluasi tren 2016-2021 menunjukkan kecenderungan meningkat (r^2 : 0,8141). Penurunan pada masa pandemi bersifat temporer dengan potensi terjadinya *rebound effect* cukup tinggi ketika normalitas kegiatan. Total sampah terangkut pada tahun 2021 mencapai 95,53 mengalami peningkatan dibandingkan saat pandemi. Situasi ini positif bagi pengendalian sampah masyarakat karena ketercakupannya oleh koordinasi oleh pengelolaan pemerintah.



Gambar 38. Data pengelolaan sampah di Kota Surakarta tahun 2021

Data dari DLH Surakarta menunjukkan bahwa 96% 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*. Tidak terjadi pembakaran sampah di Kota Surakarta yang 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 efektivitas untuk mengurangi beban tumpukan sampah, terutama di TPA
3. Pengelolaan open dumping pada TPA Putri Cempo mengakibatkan emisi metana dan potensi besar pada kebakaran sampah pada musim kemarau yang dapat meningkatkan emisi karbondioksida

Estimasi emisi landfill sampah diperhitungkan dengan asistensi *worksheet* metana sampah dari IPCC (2006). *Worksheet* tersebut bekerja berdasarkan simulasi timbulan sampah selama minimal 5 tahun. 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 sampah setempat. Penggunaan simulasi atau pemodelan *time series* membuat perhitungan emisi landfill sampah dapat dikategorikan sebagai Tier III. Berikut adalah data timbulan sampah Kota Surakarta pada periode 2007 hingga 2021.

Tabel 47 Timbulan sampah Kota Surakarta periode 2007-2020

Tahun	Produksi sampah/tahun	Sampah ke TPA	Sampah terbakar
	ton	%	%
2007	81842	100	0
2008	80494	100	0

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



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

Sumber : DLH Surakarta (2022)

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

Tabel 48. Komposisi timbulan sampah Kota Surakarta

No	Komposisi sampah	Persentase (%)
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)

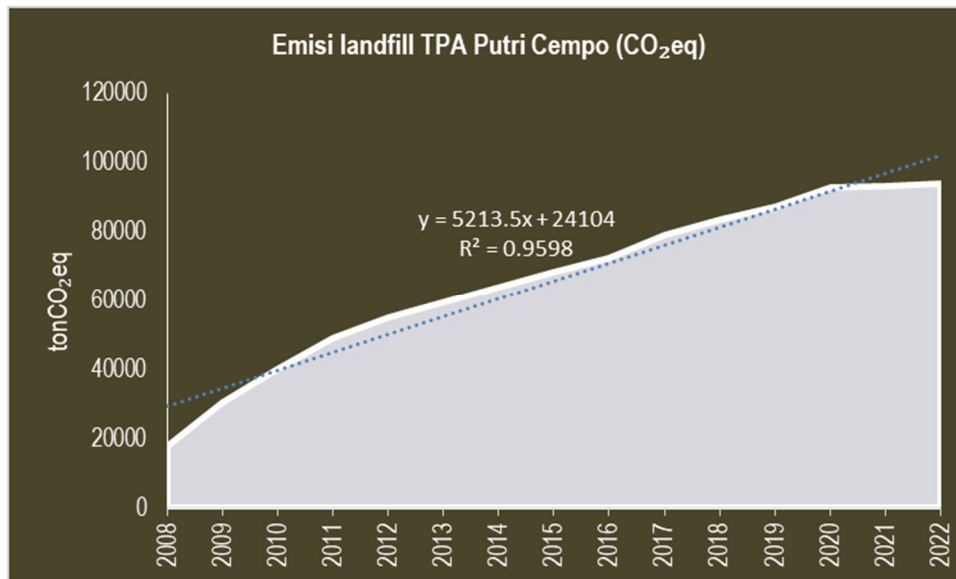
Berdasarkan komposisi, sampah di Kota Surakarta didominasi oleh tiga material yaitu organik (61,95%), plastik (13,39%) dan kertas (12,26%). Berikut adalah hasil estimasi emisi landfill sampah di Kota Surakarta dengan menggunakan model IPCC.

Tabel 49 Estimasi emisi metana landfill sampah di Kota Surakarta tahun 2020

No	Sektor aktivitas	Tumpukan sampah (ton)	Emisi (tonCH ₄ /tahun)	CO ₂ eq (ton/tahun)
1	Landfill sampah	109298	4477,98	94037,58
TOTAL EMISI			4477,98	94037,58

Sumber : perhitungan data sekunder (2021)

Emisi yang dihasilkan dari landfill TPA Putri Cempo adalah **94037,8** tonCO₂eq/tahun. Kecenderungan GRK sampah terus meningkat selama periode 2008-2022 ($r^2 : 0,959$). Nilai tersebut potensial akan terus menurun seiring dengan operasional PLTSa 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 PLTSa.



Gambar 39. Dinamika nilai GRK landfill Putri Cempo 2008-2022

(2) 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 CO₂ dan memberikan resiko bagi kesehatan lingkungan.

Beban emisi dari pembakaran sampah menghasilkan emisi variabel CO₂ (paling dominan), CH₄ dan N₂O. 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 50. 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 ₂ satuan ton/ton C fosil)
Karbondioksida (CO ₂)	0,58	3,67
Metana (CH ₄)	0,58	6,5
Dinitrogen oksida (N ₂ 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 51. 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 2021 sebagai berikut.

Tabel 52. Beban emisi aktivitas pembakaran sampah Kota Surakarta

No	Jenis/kategori sampah	Beban emisi (ton/tahun)			CO ₂ eq (ton/tahun)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1	Kertas	0.02	0.01	0.00	0.29
2	Tekstil	0.08	0.00	0.00	0.12
3	Sisa makanan	0.00	0.02	0.00	0.61
4	Karet&kulit	0.06	0.00	0.00	0.08
5	Plastik	4.77	0.01	0.00	5.09
6	Lainnya	0.13	0.01	0.00	0.35
TOTAL EMISI		5.06	0.05	0.00	6.53

Sumber : perhitungan data sekunder (2022)

Total beban emisi dari aktivitas pembakaran sampah di Kota Surakarta untuk variabel CO₂ sebesar 5,06 ton/tahun. Untuk variabel CH₄ sebesar 0,05 ton/tahun dan untuk variabel N₂O sebesar 0,00 ton/tahun. Nilai GRK tersebut setara dengan 6,53 tonCO₂eq/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) 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 CH₄ 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 CH₄ 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 (CH₄) langsung dan emisi nitrogen dioksida (N₂O) 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 53 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	88524	0	90,97	9,03	100	0	0	0
Serengan	47778	0	90,97	9,03	100	0	0	0
Pasar Kliwon	78517	0	90,97	9,03	100	0	0	0
Jebres	138775	0	90,97	9,03	100	0	0	0
Banjarsari	168770	0	90,97	9,03	100	0	0	0

Sumber : Dinas Kesehatan Surakarta (2021)

Keterangan : Populasi pada tahun 2017, 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) dengan 100% kepemilikan septic tank. Perbedaan sementara adalah ada yang merupakan kepemilikan pribadi adapula yang menggunakan akses bersama. Angka buang air besar sembarangan untuk semua kecamatan

nilainya 0 yang mengindikasikan hampir tidak ada lagi tindakan BABS di Surakarta. Berdasarkan fraksi populasi, seluruh wilayah Surakarta adalah kawasan perkotaan yang didominasi oleh masyarakat berpendapatan tinggi (90,97%).

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 54 Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi CH₄ (metana) sanitasi domestik

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

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

Selain menghasilkan emisi variabel CH₄, sanitasi domestik juga menghasilkan emisi N₂O (dinitrogen oksida). Basis perhitungan emisi N₂O berbeda dengan CH₄ karena menggunakan dasar konsumsi protein perkapita untuk dikalikan dengan jumlah populasi. Berdasarkan standar nasional Indonesia, konsumsi protein perkapita bernilai 17,76

kg/orang/tahun. Berikut ini adalah faktor konversi dan faktor emisi yang digunakan.

Tabel 55 Faktor konversi dan faktor emisi perhitungan beban emisi N₂O (nitrogen oksida) sanitasi domestik

Jenis koefisien perhitungan	Nilai	Satuan
Konsumsi protein per kapita	17,76	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 ₂ O-N/kg N

Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup (2011)

Menggunakan ketersediaan data aktivitas, faktor konversi dan faktor emisi dapat diperhitungkan estimasi emisi sanitasi domestik pada parameter metana (CH₄) maupun nitrogen dioksida (N₂O) dengan hasil sebagai berikut

Tabel 56. Estimasi emisi sektor sanitasi domestik Kota Surakarta tahun 2021

No	Kecamatan	Populasi	Emisi CH ₄ langsung (ton/tahun)	Emisi N ₂ O tidak langsung (ton/tahun)	CO ₂ eq (ton/tahun)
1	Laweyan	88578	484.96	2.72	11027.24
2	Serengan	47853	262.00	1.47	5957.31
3	Pasar Kliwon	78565	430.14	2.41	9780.70
4	Jebres	138859	760.25	4.26	17286.81
5	Banjarsari	168873	924.58	5.18	21023.31
TOTAL EMISI			2861,94	16,05	65075.36

Sumber : perhitungan data sekunder (2022)

Total GRK sanitasi domestik pada tahun 2021 mencapai 65075,36 tonCO₂eq/tahun yang hanya berasal dari parameter CH₄ dan N₂O. 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.

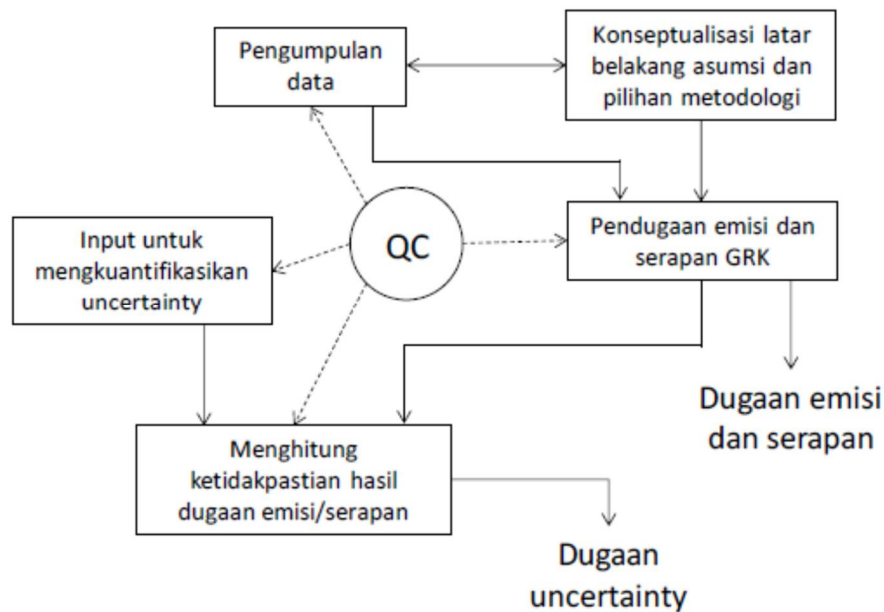
BAB IV ANALISIS KETIDAKPASTIAN DAN KATEGORI KUNCI

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 analis 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 40 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 2022 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

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

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%) dan pengolahan sawah (22,34%). Fermentasi enterik memiliki nilai lebih tinggi sebagai penanda bahwa lahan sawah di Kota Surakarta dan intensitas pengolahannya sudah semakin terbatas. Nilai pengolahan sawah sebagai kategori kunci mengalami peningkatan sebagai indikator upaya intensifikasi kegiatan untuk mengoptimalkan hasil panen dari lahan yang 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 PLTSa. 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

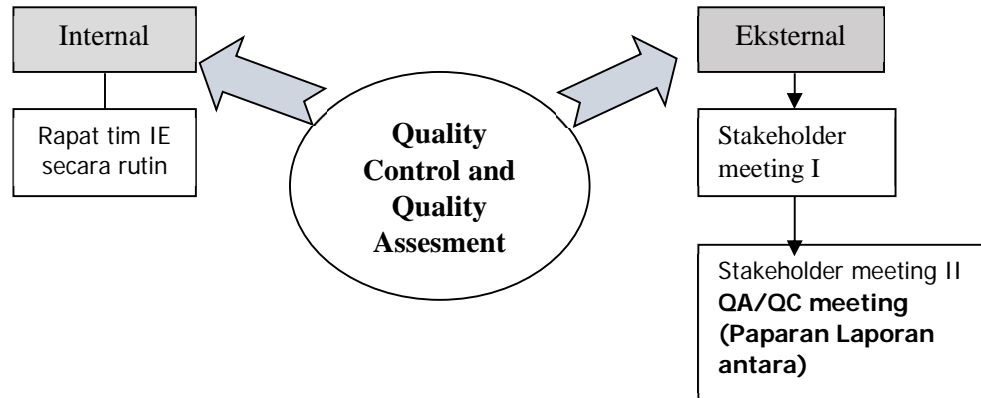
Pengembangan sistem pengendalian dan penjaminan mutu tidak hanya bermanfaat untuk menghasilkan Inventarisasi GRK berkualitas, tetapi juga secara langsung akan menghasilkan data dan informasi pelaksanaan pembangunan yang lebih akurat dan dapat diandalkan. Keberadaan data dan informasi yang akurat sangat 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 41 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 57. Prosedur umum rencana pengendalian mutu (QC) inventarisasi GRK Kota Surakarta

Tahapan	Keterangan aktivitas
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

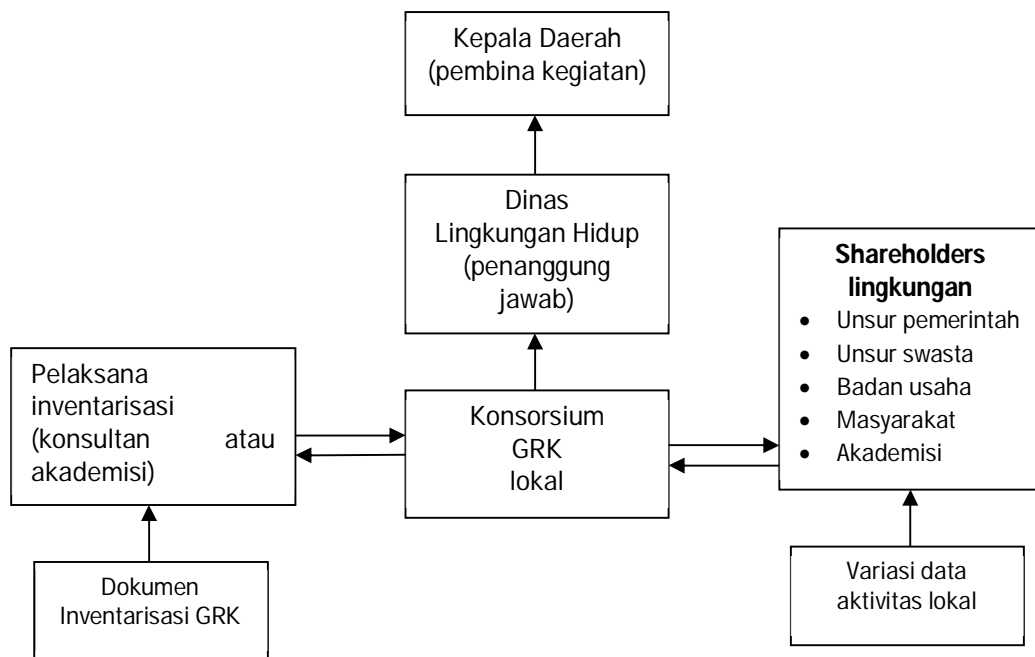
A. Perbaikan Koordinasi Data Lokal

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 42. 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 Assesment (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. 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. Arahannya 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 berkeinginan 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 PLTSa 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

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. Keterbatasan dan Aksesibilitas Data

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 shareholder. 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. Pencanangan 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.

Inventarisasi GRK tahun sebelumnya telah mengajukan beberapa rekomendasi untuk peningkatan mitigasi. Berikut adalah update evaluasi pada rekomendasi tersebut.

Tabel 58. 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
		Konsistensi pelaksanaan Inventarisasi GRK tahunan	Inventarisasi GRK dengan pendekatan koleksi data <i>top down</i> (data sekunder)	Dinas Lingkungan Hidup	Terlaksana
		Pembentukan tim kerja penyediaan data aktivitas GRK	Tim kerja yang terkordinasi dengan terdiri dari beragam instansi, BUMN, asosiasi, akademisi yang memiliki data aktivitas untuk perhitungan emisi GRK tahunan	Pemerintah Kota Surakarta	Belum terlaksana
		Pembuatan fasilitas website dan cloud untuk penyimpanan data aktivitas GRK	Website dan fasilitas penyimpanan daring untuk menampung dan	Dinas Komunikasi dan Informatika	Belum terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



			mendokumentasikan data aktivitas GRK		
		Press release hasil inventarisasi GRK	Penyampaian informasi hasil inventarisasi dan kecenderungan GRK pada masyarakat dengan mengundang media massa mainstream maupun melalui website DLH. Aksi ini untuk mengangkat kepedulian masyarakat dan keikutsertaannya dalam program mitigasi GRK maupun perubahan iklim	Dinas Lingkungan Hidup	Terlaksana namun belum sepenuhnya optimal memberikan informasi kepada masyarakat
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	Dinas Perhubungan, akademisi	Terlaksana namun belum efektif menarik minat masyarakat

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



			<p>perbelanjaan hingga industri yang ada di Kota Surakarta. Kegiatan dapat berupa kewajiban untuk menggunakan transportasi publik, penyediaan rute dan waktu layanan khusus hingga pemberian insentif pada konsumen</p>		
		<p><i>Shifting Transportation</i></p>	<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</p>	<p>Pemerintah Kota Surakarta</p>	<p>Belum terlaksana, hanya berwujud CFD atau CFN yang masih berupa car free hours</p>

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



			pedestrian yang memadai untuk fasilitas pejalan kaki. 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 namun belum optimal

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



		Pelengkapan jalur pedestrian	Jalur pedestrian harus dibangun dengan dilengkapi taman untuk optimalisasi RTH terutama pada jalur jalur utama atau kawasan wisata di Kota Surakarta	DPUPR	Terlaksana namun belum seluruh ruas
		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)	Dinas Tenaga Kerja dan Perindustrian, BPS	Belum terlaksana
		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	Pemerintah Kota Surakarta, Dinas Perdagangan	Belum terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



			lingkungan terutama berkaitan dengan upaya mitigasi perubahan iklim		
		Gerakan Hemat Listrik	Kampanye untuk menghemat listrik dengan sasaran rumah tangga	PLN, Dinas Lingkungan Hidup	Terlaksana namun terdampak pandemi
		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</i> (IPPU)	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 tradsisional	Dinas Lingkungan Hidup, Dinas Tenaga Kerja dan Perindustrian	Belum terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



3	Kluster Agrikultur, Kehutanan dan <i>Land Use</i>	Urban Farming	Optimalisasi lahan privat untuk penyediaan ruang terbuka hijau dalam format pembudidayaan tanaman pangan atau obat	Dinas Pertanian dan Peternakan	Terlaksana
		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	Pemerintah Kota Surakarta	Terlaksana sebagai bagian Proklim

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



			optimalisasi ketersediaan RTH di wilayahnya		
4	Kluster Pengelolaan Limbah	PLTSa	PLTSa Putri Cempo akan mengurangi tumpukan sampah (open dumping) yang potensial menghasilkan emisi metana serta resiko kebakaran pada musim kemarau	Pemerintah Kota Surakarta	Terlaksana dalam proses ujicoba
		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	Dinas Perdagangan	Belum terlaksana

**DOKUMEN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA
KOTA SURAKARTA 2022**



			digital untuk memudahkan pemasaran beranekaragam 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 perumahan untuk memanfaatkan emisi dari sanitasi (septic tank)	DPUPR	Terlaksana belum optimal

B. Rekomendasi

Berdasarkan pada hasil inventarisasi GRK tahun 2022 dapat diajukan beberapa rekomendasi sebagai berikut.

1. Terkait penyelenggaraan inventarisasi GRK

a. Pembentukan task force climate change

Deskripsi :

Inventarisasi GRK Kota Surakarta telah memasuki tahun ke 5 dengan satu tahun jeda karena pandemi. Usulan pembentukan satuan tugas telah disampaikan sejak inventarisasi tahun 2018, namun belum terealisasi hingga saat ini. *Task force* akan memudahkan koleksi data aktivitas, koordinasi pelaksanaan mitigasi maupun evaluasinya. Perubahan personel dalam tim kerja penyusunan GRK pada setiap tahunnya kurang ideal dalam konsistensi data dan pemahaman kegiatan. Data kerap kali mengalami perubahan dan memunculkan gap pada keberlanjutan perhitungan, Perbedaan tersebut membuat evaluasi yang dilakukan pada capaian reduksi GRK memiliki ketidakpastian lebih tinggi.

Pelaksana program : Pemerintah Kota Surakarta

b. Digitalisasi proses koleksi data

Deskripsi :

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.

Pelaksana program : DLH dan Diskominfo

c. Publikasi informasi perubahan iklim

Deskripsi :

Penyampaian informasi hasil inventarisasi dan kecenderungan GRK pada masyarakat dengan mengundang media massa mainstream maupun melalui website DLH. Aksi ini untuk mengangkat kepedulian masyarakat dan keikutsertaannya dalam program mitigasi GRK maupun perubahan iklim.

DLH saat ini telah merilis liputan maupun hasil kegiatan melalui website maupun media sosial. Namun, hal tersebut dipandang belum optimal menjangkau seluruh masyarakat Kota Surakarta. Kemauan untuk mengakses situs atau media sosial khusus instansi tidak dimiliki oleh setiap kelompok masyarakat, kecuali terkait layanan publik. Hal ini menjadikan jejaring media massa cetak maupun online mainstream dapat diandalkan untuk menyebarkan isu secara lebih luas.

Pelaksana program : Pemkot Surakarta dan DLH

d. Integrasi Inventarisasi GRK dalam dokumen perencanaan pembangunan daerah jangka panjang

Deskripsi :

Konsistensi penyusunan inventarisasi GRK memberikan informasi yang dapat dimanfaatkan sebagai forecasting pada 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. Sinergi inventarisasi GRK dan proyeksi tren masa depan dapat membantu secara sistematis upaya reduksi melalui pengendalian langsung pada sumber maupun rencana pengembangan kegiatan perkotaan.

Beberapa hal yang dapat disinergikan dalam dokumen perencanaan seperti kerjasama penanganan transportasi antar wilayah, prioritas perlindungan dan optimalisasi RTH.

Pelaksana program : DLH

2. Terkait kluster penggunaan energi

a. Pengendalian transportasi komuter

Deskripsi :

Komuter menjadi sumber permasalahan GRK kategori kunci Kota Surakarta yaitu transportasi. Akar masalah ini adalah penggunaan kendaraan pribadi sebagai moda utama mobilitas komuter. Program yang dapat dilakukan untuk dapat mengendalikan transportasi komuter antara lain adalah.

- Perluasan jaringan layanan transportasi publik (BST) hingga ke wilayah hinterland
- Penambahan unit layanan BST yang melayani jalur-jalur gerbang kota untuk memfasilitasi komuter
- Perluasan jaringan layanan feeder pada kawasan aktivitas khusus dengan potensi penumpang yang besar seperti universitas

Pelaksana : Dinas Perhubungan

b. Modernisasi pada instrumen pemantauan lalu lintas

Dinas Perhubungan Kota Surakarta saat ini telah memiliki CCTV pada hampir seluruh simpang utama. Instrumen tersebut bahkan dilengkapi dengan sensor deteksi jenis kendaraan (kelompok sepeda motor, mobil dan kendaraan angkut berat) pada jalur gerbang kota. Keberadaan sensor tersebut dapat dioptimalkan fungsinya sebagai penghitung estimasi GRK otomatis yang berbasis data real time. Hasil analisis dari sensor kamera dapat langsung disebarluaskan pada masyarakat dalam format aplikasi lalu lintas dan emisi lokal (sistem API). Informasi tersebut dapat dilengkapi dengan pemasangan probe sederhana untuk detektor nilai emisi ambient pada beberapa titik simpang dengan emisi tertinggi. Penggunaan aplikasi dapat berperan sebagai :

- ✓ Penyuplai database emisi secara perhitungan maupun ambient sesuai dengan saran pada regulasi PP 22 Tahun

2021 untuk digunakan sebagai dasar penyusunan WPPMU

- ✓ Sebagai sumber informasi terupdate (karena real time) pada masyarakat terkait kondisi kualitas udara sekaligus wahana kampanye meningkatkan kepedulian masyarakat untuk menunjukkan realitas masalah kualitas udara Kota Surakarta
- ✓ Sebagai sistem cerdas pengendalian lalu lintas dan kemacetan kota dengan memberikan informasi dan opsi awal pada masyarakat tentang masalah kepadatan kendaraan di sebuah jalur

Pelaksana kegiatan : Dishub, Balitbangda dan Diskominfo

c. Real *Car Free Day/Car Free Road*

Kota Surakarta saat ini memiliki *car free day* yang rutin diselenggarakan pada Jl Slamet Riyadi setiap hari minggu. Hanya saja, istilah *car free day* tidak sepenuhnya sesuai karena penutupan jalan hanya dilaksanakan selama 3 jam (06.00 hingga 09.00). Kota ini membutuhkan *car free day* dalam artian sebenarnya atau mungkin *car free road* untuk dapat mengefektifkan dampak kegiatan pada reduksi GRK terutama sektor transportasi.

Car Free Day dapat dilaksanakan pada saat pelaksanaan event event besar dengan membatasi akses kendaraan pribadi dan memberi ruang lebih pada kendaraan umum. Car Free Road dapat dilakukan pada ruas jalan yang tidak menjadi jalur utama transportasi Surakarta namun memiliki ketersediaan fasilitas penunjang dan nilai ekonomi yang prospektif. Sebagai contoh adalah pada ruas jalan yang melintas Ngarsopuro dan Keprabon. Kedua jalan tersebut memiliki kawasan parkir luas di halaman Keraton Mangkunegaran sekaligus daya tarik pariwisata tinggi. Konsep car free road tetap memberikan akses pada transportasi publik dan kendaraan non motor.

Pelaksana : Dishub, Bappeda dan Pemkot Surakarta

3. Terkait kluster IPPU

a. Pelengkapan database kegiatan

Deskripsi :

Data aktivitas sebagai bahan dalam perhitungan GRK cukup terbatas dari kluster ini. Kota Surakarta tidak banyak memiliki industri besar dengan sebagian besar adalah industri kecil. Pendataan secara konsisten perlu dilakukan pada kelompok industri tersebut terkait IPPU seperti penggunaan pelumas dan parafin atau wax.

Pelaksana : Dinas Perindustrian dan Perdagangan

4. Terkait kluster AFOLU

a. Optimalisasi vegetasi

Deskripsi :

Kota Surakarta memiliki keterbatasan pada RTH. Keterbatasan tersebut secara realistis sulit dipenuhi dengan upaya penambahan RTH baru melalui penyediaan lahan. Ketersediaan lahan kosong cukup terbatas dengan potensi besar konflik kepentingan dengan kebutuhan antropogenik. Berdasarkan fakta tersebut, maka optimalisasi RTH dan vegetasi yang ada dianggap lebih logis dilakukan. Optimalisasi menyasar pada kemampuan vegetasi dalam memitigasi masalah lingkungan, termasuk sebagai sekuester alami karbon.

Saat ini RTH yang ada di pusat kota Surakarta telah ditanami dengan jenis jenis pohon dengan kesesuaian fungsi cukup baik. Penelitian Sunarto et al (2022) menunjukkan bahwa terdapat beberapa pohon yang kurang sesuai ditanam sebagai bagian greenways namun mendominasi pada beberapa plot pengamatan. Komposisi manfaat tanaman menunjukkan bahwa sebenarnya kelompok pohon buah dan hias jika digabungkan akan mendominasi pohon peneduh (55%) di kawasan perkotaan Surakarta. Hasil penelitian Nancy (2022) menambahkan bahwa

vegetasi Surakarta tidak optimal dalam mengendalikan iklim mikro. Artinya bahwa selain belum optimal dalam serapan karbon, vegetasi yang ada juga telah tereduksi kemampuannya dalam memberikan beragam fungsi. Perlu dilakukan pemilihan jenis lebih baik lagi untuk penanaman berikut sekaligus melindungi pada jenis yang mampu memberi fungsi optimal seperti *Ficus Benjamina*.

Kelompok pohon harus diberikan prioritas dan ruang lebih luas untuk dikembangkan pada kawasan ini. Keberadaan pohon akan lebih efektif dibandingkan pembangunan taman yang dominan oleh kelompok tanaman semai dan semak dalam memberikan cooling effect di kawasan pedestrian, pun dengan kemampuan menyerap karbon (Ng et al, 2011). Penelitian Yu et al (2020) di Tampa dan New York menunjukkan kemampuan kelompok menurunkan temperatur lebih tinggi dibandingkan kelompok rumput dan semak ($r : -0,53$ hingga $-0,64$ dibandingkan $r : -0,14$ hingga $-0,26$).

Invetarisasi spesies oleh Sunarto et al (2022) menunjukkan bahwa di wilayah penelitian dominan oleh penanaman jenis pohon peneduh (38%). Pohon dengan fungsi peneduh biasanya memiliki kanopi yang memadai secara densitas, luas tutupan maupun keduanya. *Ficus benjamina* merupakan jenis yang wajib untuk dipertahankan dalam kawasaan ini mempertimbangkan pada fungsi ekologis lengkap yang dapat diberikan. *Pterocarpus indicus* merupakan jenis peneduh lain yang cukup sering ditemukan pada inventarisasi penelitian. Kedua spesies tersebut memiliki peran penting karena kondisi kanopinya yang memadai, genus *Ficus* memiliki *coverage area canopy* yang besar sementara *P. indicus* memiliki densitas kanopi tebal (Lin and Lin, 2010). *Swietenia mahogany* dan *Tabebuia rosea* menjadi jenis yang dapat dikembangkan karena keefektifannya dalam memberikan *cooling effect* (Tukiran et al, 2016).

Kombinasi tutupan dan densitas *canopy* memberikan peran optimal bagi pengendalian temperatur maupun karbon. Riset Ihsan dan Rosleine (2019) di Bandung menunjukkan bahwa pohon dengan ketebalan kanopi moderat dan tutupan kanopi lebar seperti *Samanea saman* lebih efektif dalam mengendalikan temperatur mikro dibandingkan jenis dengan densitas kanopi tebal atau hanya memiliki tutupan kanopi lebar. Kondisi kanopi ideal sayangnya kurang dimiliki oleh jenis jenis seperti : *Aegle marmelos*, *Alstonia scholaris* dan *Araucaria cunninghamii*. Penelitian Wujeska-Klause (2020) mengidentifikasi tanaman dengan canopy cover lebar lebih ideal dalam mengendalikan iklim mikro karena peranannya dalam meregulasi temperatur secara baik di siang maupun malam dibandingkan dengan pohon berdensitas kanopi tebal.

Rekomendasi lain terkait upaya optimalisasi RTH ini antara lain adalah :

- Ekomodifikasi, dilaksanakan dengan membangun taman taman pada grey space (kawasan terbangun) melalui modifikasi permukaan maupun optimalisasi pemanfaatan lahan kosong yang ada.
- Pemanfaatan brownfield sites sebagai lahan RTH alternatif sementara. Pemanfaatan ini dapat diarahkan dengan pemanfaatan lahan terbengkalai sebagai lahan produktif berkelanjutan. Jenis vegetasi bermanfaat ekonomi dapat ditanam untuk meningkatkan peranserta masyarakat dalam pengelolaan vegetasi perkotaan. Meskipun bersifat sementara, pemanfaatan brownfield akan meningkatkan fungsi ekosistem vegetasi perkotaan termasuk dalam serapan karbon
- 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 *Ficus benjamina*, *Pithecelobium dulce*, *Tamarindus indica* dsb. Momentum rekomendasi ini cukup ideal karena peraturan daerah terkait pengelolaan dan perlindungan baru akan segera disusun.

Pelaksana program : Pemkot Surakarta, DLH dan DPUPR

**b. Pembatasan pembangunan dan pembongkaran
*impervious surface***

Deskripsi :

Kota Surakarta melakukan perbaikan dan penyempurnaan greenways dengan membangun pedestrian. Konsep permukaan pedestrian kerap berubah hingga saat ini lebih dominan dengan impervious surface. Impervious surface adalah tipikal pelapis tanah yang memiliki sifat lebih kedap terhadap air. Kota Surakarta banyak mengalami perubahan tersebut, terutama saat pembangunan pedestrian yang pada beberapa titik menyisakan ruang sempit tanah hanya untuk pohon-pohon.

Yu et al (2020) menyatakan bahwa ada beberapa faktor yang mempengaruhi optimalisasi peran vegetasi dalam pengendalian temperatur yaitu : rasio kanopi pohon dan tutupan impervious surface, perencanaan spasial pohon dan bangunan serta tinggi relatifnya. Impervious surface merupakan faktor yang menyebabkan kenaikan temperatur pada kawasan perkotaan sekaligus mengganggu kemampuan vegetasi mengendalikannya. Penelitian Yu et al (2020) menemukan korelasi positif yang kuat antara penambahan impervious surface dan kenaikan temperatur ($r : 0,60$ hingga $0,61$). Penelitian ini merekomendasikan untuk mengembalikan beberapa impervious surface menjadi lapisan tanah alami untuk meningkatkan optimalisasi mitigasi temperatur oleh vegetasi.

Pelaksana : DPUPR

5. Terkait kluster pengelolaan limbah

a. Pelengkapan database kegiatan

Kluster pengelolaan limbah masih kesulitan menghitung emisi dari pengelolaan limbah cair (IPAL) aerobik maupun anaerob. Hal ini dikarenakan data yang dibutuhkan untuk menghitung GRK cukup terbatas. Kota Surakarta memiliki cukup banyak IPAL yang pengelolaannya terpisah pada beberapa instansi. Tidak semua IPAL mendapatkan pemantauan rutin terkait debit pengolahan hingga COD yang dihasilkan. Penyediaan database sebagai bahan hitung GRK IPAL cukup krusial mengingat potensi metana yang dapat dihasilkan.
Pelaksana : DLH, DPUPR, PDAM

BAB VIII PENUTUP

Selaras dengan tujuan pelaksanaan inventarisasi GRK Kota Surakarta tahun 2022, 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, (b) pertanian meliputi (i) aplikasi urea (ii) pengolahan tanah (lahan) (iii) pengolahan sawah, dan (c) penggunaan lahan; Kluster pengelolaan limbah meliputi (a) landfill sampah, (b) sanitasi domestik dan (c) pembakaran sampah
2. Beban emisi GRK Kota Surakarta pada tahun 2021 berdasarkan kategori utama dan parameter diinventarisasi adalah
 - a. Penggunaan energi menghasilkan emisi 3046408,49 tonCO₂eq/tahun
 - b. Proses industri dan penggunaan produk (IPPU) menghasilkan emisi 2382,14 tonCO₂eq/tahun
 - c. Pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan (AFOLU) menghasilkan emisi 60673,05 tonCO₂eq/tahun
 - d. Pengelolaan limbah menghasilkan emisi 159119,47 tonCO₂eq/tahun
3. Secara keseluruhan untuk Kota Surakarta pada inventarisasi tahun 2022 mengemisikan 3268583,75 tonCO₂eq/tahun, meningkat 5,74% dibandingkan inventarisasi tahun 2021
4. 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

5. Rekomendasi kegiatan inventarisasi tahun 2022 adalah mengupayakan pemanfaatan teknologi dalam pengelolaan GRK Kota Surakarta, menginput data GRK sebagai bagian dari perencanaan pengembangan dan pembangunan perkotaan, meningkatkan sinergi dalam mitigasi GRK dan memberikan fokus pada optimalisasi vegetasi sebagai serapan karbon serta pengendali iklim mikro.

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. (diakses 15 November 2016).
- Anderson, T.R., Hawkins, E., and Jones, P.D. 2016. CO₂ 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
- 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
- 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 (PM₁₀) 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-Klause, 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 2022**

