

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Permukiman

Permukiman merupakan bagian dari ruang lingkup hidup manusia yang berbentuk dari kumpulan satuan hunian serta dilengkapi dengan prasarana dan sarana pendukung agar dapat berfungsi sebagai lingkungan tinggal yang layak. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2011 Tentang Perumahan Dan Kawasan Permukiman, (2011) menyatakan bahwa permukiman adalah kawasan tempat berlangsungnya aktivitas manusia yang memiliki kelengkapan utilitas dasar, sehingga tidak hanya mencakup bangunan rumah, tetapi juga keseluruhan lingkungan yang menopang kehidupan warganya. Dalam konteks perkotaan, permukiman menjadi salah satu bentuk penggunaan lahan yang paling dominan sehingga berperan penting dalam membentuk pola konsumsi energi masyarakat.

Dari perspektif lingkungan, sektor permukiman memiliki kontribusi besar terhadap penggunaan energi rumah tangga seperti listrik, bahan bakar memasak, serta energi untuk kegiatan mobilitas sehari-hari. Pola konsumsi energi ini menjadi salah satu penentu utama besarnya emisi karbon di suatu wilayah. Semakin meningkat jumlah penduduk maka semakin besar peningkatan pembangunan rumah secara berdempetan menyebabkan semakin banyak aktivitas rumah tangga yang berpotensi menghasilkan emisi karbon dari konsumsi bahan bakar memasak dan konsumsi energi listrik rumah tangga (Al Latifa et al., 2022). Oleh karena itu, permukiman menjadi sektor strategis yang perlu dikaji dalam analisis jejak karbon untuk mengetahui distribusi, tingkat kontribusi, dan potensi mitigasi emisi pada skala mikro seperti kelurahan atau kecamatan.

2.2 Gas Rumah Kaca

Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan komponen atmosfer yang mampu menyerap dan memantulkan kembali radiasi inframerah, sehingga menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi. GRK utama yang berkontribusi terhadap pemanasan global meliputi karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), serta gas-gas fluorinated seperti HFC dan DF_6 . Menurut Physical dan Basis (2021), konsentrasi CO_2 telah meningkat hingga 416 ppm pada 2020, melampaui batas alami selama ribuan tahun dan menjadi pendorong terbesar perubahan iklim modern. Kenaikan konsentrasi ini terutama berasal dari aktivitas antropogenik seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan proses industri.

Selain CO_2 , metana memiliki kemampuan pemanasan yang jauh lebih tinggi dalam jangka pendek. Physical dan Basis (2021) mencatat bahwa potensi pemanasan global (GWP) metana mencapai 28-34 kali lebih besar dibanding CO_2 dalam horizon 100 tahun, sehingga kontribusinya signifikan meskipun kadarnya lebih rendah di atmosfer. Emisi metana banyak berasal dari sektor pertanian, peternakan, limbah organik, serta ekstraksi energi fosil. Sementara itu, N_2O memiliki GWP yang lebih tinggi, yaitu sekitar 273 kali CO_2 , dan terutama dilepaskan dari aktivitas pertanian akibat penggunaan pupuk nitrogen. Ketiga gas ini membentuk mayoritas peningkatan efek rumah kaca yang terukur dalam beberapa dekade terakhir.

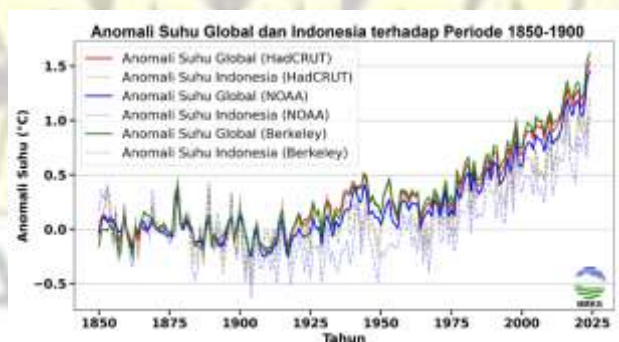
Gas-gas industri seperti HFC, PFC, SF_6 , dan NF_3 juga berperan meskipun kadarnya kecil, karena memiliki GWP ribuan kali lebih tinggi daripada CO_2 . Laporan UNEP (2022) menunjukkan bahwa HFC digunakan sebagai refrigeran pengganti CFC, namun berpotensi meningkatkan pemanasan global jika tidak dikendalikan. Oleh karena

itu, berbagai perjanjian internasional seperti Kigali Amendment (2016) ditetapkan untuk membatasi produksi dan konsumsi HFC secara bertahap. Secara keseluruhan, peningkatan konsentrasi GRK adalah indikator utama perubahan iklim global yang memerlukan pengendalian terintegrasi, baik melalui kebijakan mitigas, transisi energi, maupun konservasi ekosistem penyerap karbon.

2.3 Pemanasan Global

2.3.1 Pengertian Pemanasan Global

Pemanasan global adalah kenaikan suhu rata-rata atmosfer dan lautan bumi yang diamati secara signifikan sejak era pra-industri, akibat meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (seperti CO₂, CH₄, dan N₂O) yang menahan radiasi termal dari permukaan bumi. Proses ini didorong terutama oleh pembakaran bahan bakar fosil, perubahan penggunaan lahan, dan kegiatan antropogenik lain yang menambah akumulasi gas rumah kaca di atmosfer. Kenaikan suhu rata-rata global berimplikasi pada perubahan pola cuaca ekstrem, kenaikan muka laut, dan terganggunya sistem ekologis, sehingga menjadi isu sentral dalam kebijakan perubahan iklim nasional.



Gambar 2.1 Suhu udara rata-rata global dan Indonesia dibandingkan dengan periode pra-industri (1850-1900).

Sumber: Catatan Iklim dan Kualitas Udara 2024 BMKG.

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa dalam beberapa dekade terakhir, anomali suhu global telah meningkat lebih dari $1,0^{\circ}\text{C}$ dibandingkan dengan suhu pada periode pra-industri (1850-1900), dengan tahun 2024 mencatat anomali tertinggi yang melampaui $1,5^{\circ}\text{C}$. Tren serupa terjadi di Indonesia, meskipun dengan anomali yang lebih rendah dibandingkan global. Perbedaan suhu antara Indonesia dan global cenderung stabil sepanjang waktu, meskipun terdapat variasi lebih besar pada periode tertentu.



Gambar 2.2 Laju perubahan suhu udara rata-rata tahunan di Indonesia.

Sumber: Catatan Iklim dan Kualitas Udara 2024 BMKG.

Sejak tahun 1981-2024, suhu udara rata-rata di Indonesia telah meningkat dengan laju sekitar $0,02^{\circ}\text{C}$ setiap tahunnya, yang secara akumulatif mencapai sekitar $1,0^{\circ}\text{C}$ dalam 44 tahun terakhir. Gambar 2.2 menunjukkan wilayah dengan laju pemanasan tertinggi ($\geq 1,0^{\circ}\text{C}$ dalam 44 tahun terakhir) ditandai dengan simbol merah tua, yang tersebar di Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Kalimantan, Sulawesi, dan Maluku. Sebaliknya, wilayah dengan kenaikan suhu lebih rendah ($< 0,2^{\circ}\text{C}$ dalam 44 tahun terakhir)

ditandai dengan simbol kuning, yang teramati di Sulawesi Barat dan Maluku. Pola ini menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Indonesia mengalami tren pemanasan yang signifikan, dengan variasi antar stasiun pengamatan yang mencerminkan perbedaan perubahan suhu di berbagai daerah.

2.3.2 Dampak Pemanasan Global

Pemanasan global memberikan pengaruh signifikan terhadap sistem iklim bumi, terutama melalui meningkatnya frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem. Kenaikan suhu permukaan memicu perubahan pola curah hujan yang tidak menentu, sehingga beberapa wilayah mengalami peningkatan risiko banjir, sementara wilayah lainnya mengalami kekeringan berkepanjangan. Perubahan iklim ini juga berdampak pada musim tanam, ketersediaan air, serta siklus hidrologi, sehingga berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem dan ketahanan pangan di berbagai negara, termasuk Indonesia.

Selain memengaruhi kondisi atmosfer, pemanasan global berdampak langsung pada sistem laut dan pesisir. Meningkatnya suhu global mempercepat pencairan es di kutub dan gletser, yang kemudian menyebabkan kenaikan permukaan air laut. Fenomena ini meningkatkan risiko abrasi, intrusi air laut, dan hilangnya daratan di kawasan pesisir rendah. Indonesia sebagai negara kepulauan sangat rentan terhadap dampak tersebut, terutama bagi wilayah pesisir padat penduduk. Kenaikan suhu laut juga mempengaruhi kesehatan terumbu karang, meningkatkan kejadian pemutihan (*coral bleaching*), serta mengancam keanekaragaman hayati laut.

Pemanasan global juga memberikan dampak terhadap sektor sosial, kesehatan, dan ekonomi. Peningkatan suhu lingkungan dapat memicu gangguan

kesehatan seperti heat stress, penyakit pernapasan, dan peningkatan penyebaran berbasis vektor. Secara ekonomi, kerusakan infrastruktur akibat bencana iklim, terganggunya produktivitas sektor pertanian, serta meningkatnya kebutuhan energi untuk pendingin akan menambah beban biaya bagi masyarakat maupun pemerintah. Pada akhirnya, dampak pemanasan global bersifat multidimensi dan saling berkaitan, sehingga membutuhkan upaya mitigas dan adaptasi yang terencana dan terintegrasi di berbagai sektor.

2.4 Karbon

Karbon adalah unsur kimia yang menjadi komponen dasar dalam semua makhluk hidup serta berperan penting dalam proses biogeokimia di bumi, termasuk siklus karbon yang mengatur keseimbangan antara atmosfer, biosfer, dan hidrosfer. Unsur ini memiliki kemampuan membentuk berbagai ikatan kimia yang stabil, sehingga memungkinkan terbentuknya senyawa organik seperti karbohidrat, protein, dan lemak, maupun senyawa anorganik seperti karbon dioksida (CO_2). Menurut (IPCC, 2021), karbon terutama tersimpan dalam bentuk biomassa, tanah, lautan, dan atmosfer, dengan dinamika pergerakan yang dipengaruhi oleh proses alamiah serta aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan perubahan penggunaan lahan. Perubahan pada keseimbangan karbon di atmosfer, terutama peningkatan CO_2 , berkontribusi langsung terhadap intensifikasi efek rumah kaca dan pemanasan global.

2.5 Jejak Karbon

Jejak karbon merupakan ukuran total emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O) yang dihasilkan secara langsung maupun tidak langsung dari suatu aktivitas, produk, individu, maupun wilayah.

Menurut (Thomas & Minx, 2008), jejak karbon dihitung berdasarkan seluruh emisi yang dilepaskan ke atmosfer sepanjang siklus hidup suatu kegiatan atau produk, termasuk proses produksi, distribusi, konsumsi, hingga pembuangan. Konsep ini berkembang menjadi salah satu indikator penting dalam menilai kontribusi terhadap perubahan iklim karena menggambarkan secara kuantitatif beban karbon yang dilepaskan oleh aktivitas manusia.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, jejak karbon digunakan sebagai alat evaluasi untuk mengidentifikasi sumber emisi terbesar dan merumuskan strategi mitigasi. (Pandey et al., 2011) menyatakan bahwa pengukuran jejak karbon memiliki peran strategis dalam perencanaan energi, tata ruang, maupun pengelolaan lingkungan karena memungkinkan pengambilan keputusan untuk membandingkan tingkat efisiensi dan intensitas karbon pada berbagai sektor. Perhitungan jejak karbon pada level permukiman misalnya, melibatkan konsumsi listrik, penggunaan bahan bakar memasak, hingga pola mobilitas masyarakat, sehingga mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai tekanan karbon suatu wilayah.

Secara global, penggunaan jejak karbon semakin meluas seiring meningkatnya kesadaran akan dampak pemanasan global. Berbagai studi menunjukkan bahwa sektor rumah tangga dan permukiman memiliki kontribusi signifikan terhadap emisi karbon, terutama di wilayah urban dengan konsumsi energi yang tinggi. Perhitungan jejak karbon untuk suatu komunitas memungkinkan pemetaan potensi pengurangan emisi melalui perubahan perilaku, peningkatan efisiensi energi, dan kebijakan berbasis wilayah (Firdaus, 2019). Dengan demikian, analisis jejak karbon menjadi dasar penting dalam merancang strategi mitigasi perubahan iklim tingkat lokal maupun nasional.

2.5.1 Jejak Karbon Primer

Jejak karbon primer merujuk pada emisi GRK yang dilepaskan secara langsung dari aktivitas pembakaran bahan bakar fosil oleh pengguna akhir. Emisi ini dihasilkan dari penggunaan energi primer seperti BBM kendaraan (bensin, solar), serta bahan bakar memasak seperti LPG. Menurut (IPCC, 2006), jejak karbon primer dihitung berdasarkan volume energi yang dikonsumsi dikalikan dengan faktor emisi dan nilai kalor masing-masing jenis bahan bakar. Dengan demikian, jejak karbon primer menggambarkan kontribusi langsung suatu aktivitas terhadap peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer melalui proses pembakaran yang terjadi pada sumber emisinya.

Dalam sektor permukiman, jejak karbon primer banyak dipengaruhi oleh mobilitas masyarakat menggunakan kendaraan pribadi serta kebutuhan energi memasak yang masih bergantung pada bahan bakar fosil. Kedua aktivitas ini menghasilkan CO₂, CH₄, dan N₂O yang dihitung secara langsung berdasarkan konsumsi bahan bakar aktual.

Tabel 2.1 Faktor Emisi dan Nilai Kalor Pembakaran Oleh Kendaraan

Bahan Bakar Minyak	Faktor Emisi (Kg/Tj)	Nilai Kalor (Tj/L)
Gasoline (Premium, Pertamina, Peralite)	69300	33 x 10 ⁻⁶
Solar	74100	36 x 10 ⁻⁶

Sumber: (IPCC, 2006)

Tabel 2.2 Faktor Emisi dan Nilai Kalor LPG

Bahan Bakar Memasak	Faktor Emisi (Kg/Tj)	Nilai Kalor (Tj/L)
Gas LPG	63100	0,0000473

Sumber: (IPCC, 2006)

2.5.2 Jejak Karbon Sekunder

Jejak karbon sekunder merupakan emisi GRK yang dihasilkan secara tidak langsung akibat konsumsi energi atau produk yang proses produksinya menghasilkan emisi, tetapi tidak terjadi pada lokasi pengguna akhir. Pada sektor permukiman, salah satu komponen terbesar jejak karbon sekunder adalah konsumsi listrik, karena emisi CO₂, CH₄, dan N₂O dihasilkan oleh pembangkit listrik yang biasanya masih bergantung pada bahan bakar fosil seperti batu bara, gas alam, atau diesel. Menurut (IPCC, 2006), emisi tidak langsung ini dihitung berdasarkan jumlah energi listrik yang digunakan masyarakat dikalikan dengan faktor emisi listrik nasional, yang ditetapkan sesuai kondisi sistem pembangkit di setiap negara. Dengan demikian, jejak karbon sekunder menggambarkan besarnya kontribusi pengguna terhadap emisi yang terjadi sepanjang rantai energi. Meskipun proses pembakarannya tidak dilakukan oleh pengguna secara langsung.

Tabel 2.3 Faktor Emisi Konsumsi Listrik

Jenis	Faktor Emisi (Ton CO ₂ /MWh)
Konsumsi Listrik	0,93

Sumber: (Kementrian ESDM, 2018)

2.6 Metode Perhitungan Jejak Karbon

Menghitung jejak karbon pada suatu wilayah umumnya dilakukan melalui pendekatan inventarisasi GRK yang bertujuan untuk mengidentifikasi serta mengkuantifikasi besaran emisi yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia. Pendekatan ini banyak digunakan dalam kajian lingkungan karena mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai kontribusi suatu aktivitas terhadap perubahan iklim.

Inventarisasi emisi GRK pada dasarnya dilakukan dengan menghubungkan data aktivitas yang berpotensi menghasilkan emisi dengan faktor emisi yang sesuai sehingga diperoleh besaran emisi dalam satuan tertentu.

Perhitungan emisi GRK mengacu pada pedoman yang dikembangkan oleh IPCC melalui *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Dalam pedoman tersebut dijelaskan bahwa besaran emisi dihitung menggunakan persamaan umum berupa perkalian antara data aktivitas dan faktor emisi. Data aktivitas menggambarkan tingkat konsumsi energi, penggunaan bahan bakar, maupun aktivitas lain yang menghasilkan emisi. Sedangkan faktor emisi merupakan koefisien yang menunjukkan jumlah emisi gas rumah kaca yang dilepaskan per satuan aktivitas (IPCC, 2006).

Dalam penelitian ini, metode perhitungan jejak karbon digunakan untuk mengestimasi besaran emisi CO₂ yang dihasilkan dari aktivitas permukiman di wilayah kajian. Pendekatan berbasis data aktivitas dan faktor emisi digunakan karena mampu menghasilkan estimasi yang sistematis serta sesuai dengan praktik inventarisasi emisi yang diakui secara internasional.

2.7 Pemetaan Jejak Karbon Menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan sistem berbasis komputer yang digunakan untuk mengelola, menganalisis, serta menampilkan data yang memiliki informasi spasial atau keruangan. SIG memungkinkan integrasi antara data atribut dan data spasial sehingga dapat digunakan untuk menganalisis distribusi suatu fenomena secara geografis. SIG mampu mengintegrasikan berbagai jenis data yang berkaitan dengan lokasi sehingga memudahkan proses analisis spasial serta penyajian informasi dalam bentuk peta tematik.

Dalam kajian lingkungan, SIG banyak dimanfaatkan untuk memetakan distribusi berbagai fenomena, termasuk emisi gas rumah kaca dan jejak karbon pada suatu wilayah. Pemetaan ini bertujuan untuk menggambarkan pola sebaran emisi secara spasial sehingga dapat diketahui wilayah yang memiliki tingkat emisi relatif tinggi maupun rendah.

Pada penelitian ini, hasil perhitungan jejak karbon dari aktivitas rumah tangga pada masing-masing wilayah penelitian diolah dan dipetakan menggunakan perangkat lunak ArcMap yang merupakan bagian dari platform ArcGIS. Pemetaan tersebut menghasilkan peta tematik sebaran jejak karbon sehingga dapat diketahui perbedaan tingkat emisi antar wilayah penelitian secara visual.

2.8 Metode Klasifikasi *Natural Breaks* (Jenks)

Dalam penyajian data pada peta tematik, proses klasifikasi diperlukan untuk mengelompokkan nilai data ke dalam beberapa kelas sehingga lebih mudah dipahami. Salah satu metode klasifikasi yang sering digunakan dalam pemetaan adalah metode *Natural Breaks* (Jenks). Metode ini mengelompokkan data berdasarkan pola distribusi alami yang terdapat pada dataset sehingga nilai-nilai yang memiliki karakteristik serupa akan berada dalam kelas yang sama.

Metode *Natural Breaks* bekerja dengan meminimalkan variasi dalam satu kelas serta memaksimalkan perbedaan nilai antar kelas, sehingga klasifikasi yang dihasilkan lebih representatif terhadap distribusi data. Dalam penelitian pemetaan tematik, metode ini banyak digunakan karena mampu menampilkan pola variasi data secara lebih jelas dibandingkan metode interval yang membagi data secara merata.

Dalam penelitian ini, metode *Natural Breaks* digunakan untuk mengelompokkan hasil perhitungan jejak karbon pada wilayah penelitian ke dalam tiga kategori tingkat

emisi, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Proses klasifikasi dilakukan menggunakan fitur klasifikasi yang tersedia pada perangkat lunak SIG sehingga diperoleh batas kelas yang sesuai dengan distribusi data jejak karbon yang dihasilkan.

2.9 Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian Pemetaan Jejak Karbon pada Sektor Energi dari Aktivitas Pemukiman di Kota Bogor, Jawa Barat, menyimpulkan bahwa total emisi CO₂ dari sektor energi di Kota Bogor sebesar 2.244.809,6 ton/tahun, dengan kegiatan perumahan menjadi fokus penilaian ini. Di antara enam kecamatan yang dianalisis, Kabupaten Bogor Utara diidentifikasi sebagai kontributor utama emisi ini, terhitung sekitar 53,15% dari total CO₂ dari kendaraan dan juga menunjukkan emisi tertinggi dari konsumsi listrik. Sementara pembakaran bahan bakar kendaraan adalah sumber tunggal CO₂ terbesar, bahan bakar memasak dan penggunaan listrik juga memainkan peran penting, dengan Tanah Sareal berkontribusi paling besar terhadap emisi bahan bakar memasak. Temuan ini menyoroti dampak signifikan Kota Bogor, menekankan perlunya strategi mitigasi yang ditargetkan di daerah-daerah yang berkontribusi tinggi seperti Bogor Utara (Chaerunnisa *et al.*, 2024).

Penelitian tentang Analisis Jejak Karbon Dari Aktivitas Transportasi di Universitas Andalas, mengungkapkan total jejak karbon dari kegiatan transportasi sebesar 2.221.020 KgCO₂eq/tahun, dihitung dari data kendaraan di gerbang utama dan belakang. Sebaliknya, total kapasitas penyerapan CO₂ oleh vegetasi kampus secara signifikan lebih tinggi, diperkirakan 9.297.557,51 secara KgCO₂/tahun. Kapasitas penyerapan yang substansif ini menunjukkan bahwa vegetasi jalan yang ada di Kampus Andalas sebagian besar cukup untuk mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan oleh kegiatan transportasi.

Sementara pohon Trembesi diidentifikasi sebagai penyerap CO₂ paling efektif di antara spesies yang diteliti, temuan ini menekankan peran penting vegetasi kampus dalam mengurangi gas rumah kaca, meskipun sumber CO₂ lain di luar transportasi dan kebutuhan untuk mempertahankan vegetasi yang ada juga harus dipertimbangkan (Serlina *et al.*, 2024).

Penelitian tentang Kajian Jejak Karbon (*Carbon Footprint*) di FMIPA Universitas Negeri Semarang, menyimpulkan bahwa jejak karbon di FMIPA UNNES menurun secara signifikan selama periode pandemi 2020, turun menjadi 4.312,27 ton setara CO₂ per bulan dari 10.670,25 ton setara CO₂ per bulan sebelum wabah pandemi. Emisi terbesar, baik sebelum maupun selama pandemi, berasal dari kegiatan Lingkup Tiga, yang meliputi transportasi oleh dosen, staf, dan mahasiswa, penggunaan kertas, dan pembuangan limbah. Pengurangan ini Sebagian besar terkait dengan kebijakan seperti 'bekerja dari rumah' dan 'belajar dari rumah', yang membatasi penggunaan kendaraan bermotor dan akibatnya menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi terkait kampus. Temuan menunjukkan bahwa upaya efisiensi seperti itu (Rahayuningsih *et al.*, 2021).

UNMAS DENPASAR