



Faktor geografis: Bagaimana kondisi lingkungan memengaruhi pemantauan metana dari luar angkasa

Satelit sedang mengubah pemantauan metana secara global dan memberikan wawasan baru serta data yang dapat ditindaklanjuti untuk mendukung upaya mitigasi. Dengan semakin banyaknya instrumen pemantau metana di orbit, berbagai pihak—termasuk LSM, pemerintah, dan sektor lainnya—semakin tertarik untuk mengintegrasikan data satelit ke dalam pekerjaan mereka. Laporan ini berfungsi sebagai sumber informasi bagi pengguna baru dan membantu mereka memanfaatkan data satelit secara efektif dengan mengidentifikasi wilayah yang kondisinya dapat memengaruhi cakupan data.

18 Maret 2025

Dr Sarah Shannon (Ember) dan
Dr Ioannis Biniotoglou (Clean Air Task Force)

Daftar isi

Ringkasan Eksekutif	4
1. Pemantauan emisi metana	9
Satelit akan memungkinkan pemantauan metana global yang efektif	9
Mengapa mengukur metana?	9
Peran satelit dalam sistem pengamatan global	11
2. Kondisi lingkungan yang menantang	16
Kondisi lingkungan dan dampaknya	18
Tutupan awan	19
Kekasaran medan	21
Elevasi matahari	23
Kecerahan permukaan	25
Kecepatan angin	27
Metodologi kami	28
3. Kesulitan dalam memantau wilayah tertentu	30
Perbedaan antarnegara dalam kemudahan pemantauan satelit terhadap produksi batu bara	33
Perbedaan antarnegara dalam kemudahan pemantauan satelit terhadap produksi minyak dan gas	36
Studi Kasus	39
4. Langkah ke depan	44
Teknologi alternatif untuk pengukuran metana	45
Melampaui teknologi spesifik	47
Metodologi	48
Ucapan terima kasih	54

Tentang

Laporan ini bertujuan untuk membantu pemerintah, kelompok masyarakat sipil, dan industri dalam memahami pengamatan metana dari luar angkasa—langkah penting dalam upaya memerangi perubahan iklim.

Semakin banyak sensor metana yang mengorbit Bumi, memberikan wawasan yang belum pernah ada sebelumnya mengenai emisi global. Sensor-sensor ini memiliki berbagai tingkat resolusi spasial, mulai dari pemantauan metana pada skala kilometer hingga deteksi emisi di tingkat fasilitas. Data yang dihasilkan memungkinkan berbagai aplikasi, mulai dari pemantauan emisi di tingkat nasional hingga respons cepat terhadap peristiwa “super-emitter”.

Namun, kondisi lingkungan setempat dapat memengaruhi ketersediaan data satelit di beberapa lokasi dan/atau waktu tertentu dalam setahun. Pengguna baru data satelit perlu memahami dampak faktor-faktor ini dan mempertimbangkannya saat merencanakan pemanfaatan data satelit dalam upaya mitigasi mereka.

Dalam laporan ini, kami mengeksplorasi bagaimana kondisi lingkungan—seperti tutupan awan dan karakteristik medan—dapat memengaruhi ketersediaan data satelit di berbagai wilayah di dunia sepanjang tahun.

Dengan memberikan wawasan ini, kami berharap dapat membantu pengguna baru memahami bagaimana faktor lingkungan dapat memengaruhi cakupan data, serta menyoroti aspek yang perlu diperhatikan dalam memilih strategi pengamatan yang paling sesuai dengan kebutuhan mereka.

Secara khusus, kami memetakan wilayah-wilayah di mana pemantauan metana melalui satelit dapat menghadapi tantangan akibat lima faktor utama: tingkat keawanan, karakteristik medan (seperti daerah pegunungan), tingkat kecerahan permukaan, kecepatan angin, dan ketersediaan sinar matahari. Kami berfokus pada lokasi yang memiliki kegiatan ekstraksi minyak, gas, dan batu bara untuk meneliti bagaimana faktor lingkungan dapat memengaruhi pemantauan metana di titik-titik penting tersebut.



Faktor lingkungan dan dampaknya terhadap pengamatan metana dari satelit

Pengamatan metana dari luar angkasa mengubah upaya mitigasi emisi secara signifikan. Beragam sensor satelit yang terus berkembang kini menyediakan data yang disesuaikan dengan berbagai kebutuhan pengguna. Misalnya, flux mappers mengukur metana dalam skala luas untuk meningkatkan inventaris emisi, sementara point-source imagers menyediakan data resolusi tinggi di tingkat fasilitas, sehingga memungkinkan tindakan mitigasi yang lebih cepat. Seiring dengan bertambahnya jumlah sensor, berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan aksesibilitas data. Upaya ini mulai membuahkan hasil, dengan semakin banyak pihak—termasuk pemerintah, LSM, dan jurnalis—mengeksplorasi cara mengintegrasikan data metana satelit ke dalam pekerjaan mereka. Namun, untuk memanfaatkan data ini secara efektif, pengguna baru harus memahami karakteristik setiap produk data dan menilai kesesuaiannya untuk tugas tertentu.

Mengintegrasikan pengamatan metana dari satelit ke dalam upaya mitigasi emisi merupakan langkah penting. Sebanyak 157 negara telah menandatangani Global Methane Pledge, sebuah komitmen sukarela untuk mengurangi emisi metana global sebesar 30% pada tahun 2030 dibandingkan dengan tingkat tahun 2020. Instrumen metana berbasis satelit memainkan peran krusial dalam mencapai target ini, dengan memberikan pemahaman baru tentang emisi

metana global, meningkatkan transparansi dan akuntabilitas, serta memungkinkan perbaikan cepat terhadap kebocoran metana yang tidak disengaja. Namun, meskipun memiliki keunggulan unik dan perspektif luas, efektivitas satelit dalam pemantauan metana di beberapa wilayah tetap terbatas akibat faktor lingkungan seperti tutupan awan, rendahnya cahaya selama musim dingin, dan karakteristik medan.

Laporan ini memetakan variasi regional dari kondisi lingkungan yang dapat mengurangi efektivitas satelit dalam memantau emisi metana. Sebagai contoh, banyak wilayah di daerah tropis mengalami tutupan awan yang persisten, sementara wilayah lintang tinggi menerima cahaya rendah selama beberapa bulan, yang menghambat pengamatan metana dari beberapa sensor akibat kurangnya sinyal yang memadai. Dampak gabungan dari faktor-faktor lingkungan ini menyebabkan beberapa satelit tidak dapat mendeteksi emisi metana atau memiliki efektivitas yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan wilayah yang memiliki kondisi lebih mendukung, seperti yang sering ditampilkan dalam studi konseptual. Penurunan efektivitas ini dapat membuat produk tertentu menjadi kurang sesuai untuk beberapa jenis penggunaan.

Laporan ini juga memperkirakan bahwa 30% infrastruktur hulu batu bara serta minyak dan gas berada di wilayah yang sulit diamati dengan instrumen berbasis satelit akibat tutupan awan, rendahnya tingkat cahaya, permukaan gelap, dan medan pegunungan.

“

Satelit merevolusi cara kita memantau metana dari luar angkasa. Dengan semakin banyaknya data satelit terbuka, minat pengguna untuk memahami cara memanfaatkan pengukuran ini secara efektif terus meningkat. Laporan ini mengkaji bagaimana kondisi lingkungan dapat memengaruhi deteksi metana oleh satelit, yang terkadang membatasi cakupan data di wilayah tertentu. Dengan menjelaskan keterbatasan ini, kami bertujuan untuk membantu pengguna dalam memilih data satelit yang paling efektif untuk kebutuhan mereka. Memperluas komunitas pengguna data satelit membuka lebih banyak peluang untuk mengurangi emisi metana—langkah penting dalam upaya menekan perubahan iklim.

Sarah Shannon

Analisis Data Satelit, Ember



Sorotan

01 **Kondisi lingkungan dapat membatasi kemampuan satelit untuk memantau emisi**

Kondisi lingkungan seperti tutupan awan, kecepatan angin, tingkat kecerahan permukaan, medan pegunungan, dan variasi musiman dalam ketersediaan sinar matahari dapat memengaruhi pendeteksian metana berbasis satelit. Dampak-dampak ini bervariasi tergantung sensor, lokasi, dan waktu dalam setahun.

Misalnya, di wilayah lintang tinggi, sudut matahari yang rendah selama musim dingin mengurangi cahaya yang tersedia untuk sensor satelit, sementara permukaan hutan yang gelap atau yang tertutup salju memantulkan lebih sedikit cahaya inframerah yang digunakan satelit untuk mendeteksi metana, sehingga membuat pemantauan menjadi lebih sulit. Angin kencang dapat menyebarkan kabut metana, sementara medan pegunungan dapat menciptakan bayangan lokal yang membatasi cahaya yang diperlukan untuk deteksi. Di daerah tropis, tutupan awan yang persisten dapat menghalangi pemantauan metana menggunakan satelit.

Seberapa besar efek ini memengaruhi deteksi metana berbasis satelit bergantung pada sensor yang digunakan dan tujuan pemanfaatan data. Misalnya, pemetaan fluks area, yang mengukur metana di wilayah luas dalam skala kilometer, bisa terhambat oleh tutupan awan yang terus-menerus, sehingga berpotensi mengganggu pemantauan fluks di tingkat negara. Sebaliknya, sensor satelit resolusi tinggi yang dirancang untuk mendeteksi sumber titik metana dari fasilitas individu masih dapat mengidentifikasi kepulan gas di antara awan yang terputus-putus.

02 **Sebanyak 30% dari produksi batu bara global berasal dari wilayah yang sulit dipantau**

Analisis kami terhadap produksi batu bara global mengestimasi bahwa sepertiga dari operasi produksi terletak di wilayah yang pengamatan metana satelitnya terhambat oleh faktor lingkungan. Contohnya, Indonesia, sebagai produsen batu bara utama, memiliki wilayah yang sangat menantang untuk pemantauan metana dengan satelit akibat tutupan awan yang persisten dan medan terjal. Kondisi ini membuat beberapa produk satelit tidak dapat digunakan untuk mendeteksi emisi di wilayah yang menghasilkan 84% dari total produksi batu bara nasional.

03 **Sebanyak 29% dari produksi minyak dan gas darat global berasal dari wilayah yang sulit dipantau**

Perkiraan menunjukkan bahwa sepertiga dari produksi minyak dan gas darat global terjadi di wilayah dengan kondisi pengamatan yang menantang bagi satelit. Di wilayah-wilayah ini, yang mencakup sebagian wilayah Amerika Serikat, dan Kanada, sistem pengamatan harus dirancang dengan hati-hati untuk mempertimbangkan keterbatasan ini dan mungkin lebih bergantung pada pengukuran alternatif untuk memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang emisi.



1. Pemantauan emisi metana

Satelit akan memungkinkan pemantauan metana global yang efektif

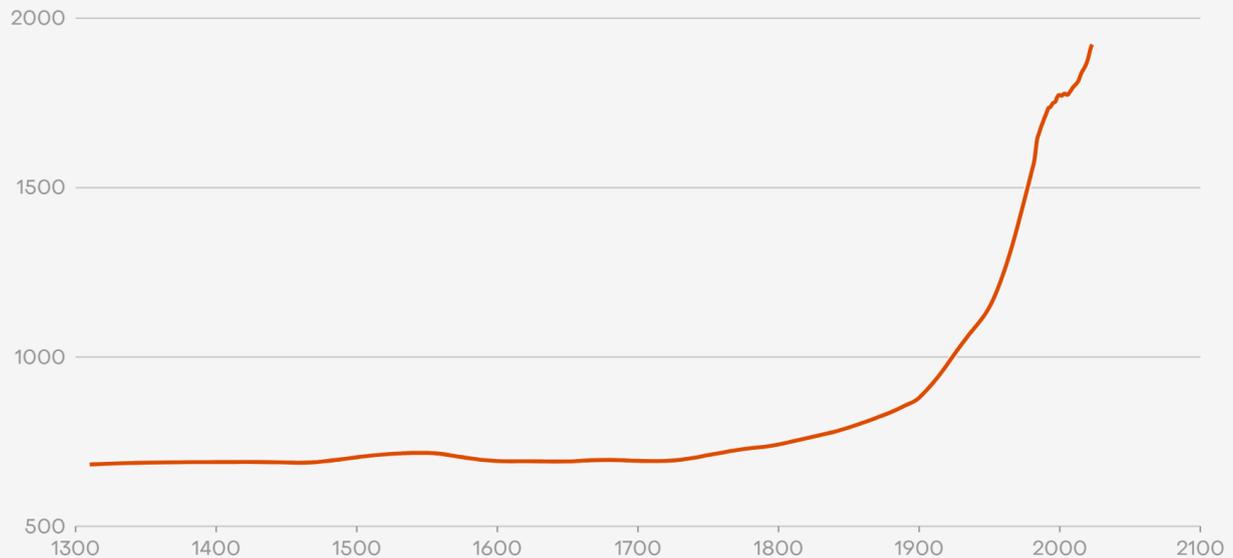
Pengukuran metana berbasis satelit merevolusi pemahaman global tentang emisi metana dan akan menjadi tulang punggung sistem pemantauan metana global yang sedang berkembang.

Mengapa mengukur metana?

Metana adalah gas rumah kaca yang sangat kuat dengan potensi pemanasan global yang jauh lebih besar daripada karbon dioksida, lebih dari [80 kali lebih kuat](#) per ton dalam 20 tahun dan sekitar 30 kali lebih kuat dalam 100 tahun. Konsentrasi metana telah meningkat pesat sejak masa pra-industri dan menyebabkan kenaikan [setengah derajat \(0,5 °C\)](#) pemanasan global saat ini (1,1 °C). Sebagian besar peningkatan ini disebabkan oleh emisi dari beberapa sektor ekonomi, yaitu [bahan bakar fosil \(35%\), limbah \(20%\), dan pertanian \(40%\)](#).

Konsentrasi metana di atmosfer telah meningkat drastis sejak awal abad ke-20 akibat aktivitas antropogenik

Konsentrasi metana dalam satuan bagian per miliar (ppb)



Sumber: Data untuk 1984-2023 – Tren NOAA GML dalam Metana Atmosfer CH₄, Data untuk 1300-1982 – Etheridge dkk. (1998)

EMBER

Untuk menjaga suhu bumi di bawah 1,5 °C sesuai dengan Perjanjian Paris, pengurangan metana secara cepat dari semua sektor yang disebutkan di atas sangat dibutuhkan. Demi mewujudkannya, 157 negara telah menandatangani [Global Methane Pledge](#), komitmen sukarela untuk mengurangi emisi metana global setidaknya 30% pada 2030 dibandingkan dengan tingkat tahun 2020. Pemantauan emisi metana secara akurat di seluruh dunia sangat penting untuk membantu memandu upaya mitigasi, membangun transparansi dan akuntabilitas, serta memantau kemajuan menuju tujuan yang ditetapkan.

Hingga baru-baru ini, sebagian besar pemahaman kita tentang emisi global berasal dari studi ilmiah yang dilakukan di area geografis terbatas atau inventarisasi bottom-up, yaitu pencatatan kegiatan yang menghasilkan emisi metana dan faktor emisi umum. Meskipun sangat berguna, metode ini tidak dapat memperhitungkan variasi emisi metana dan keragaman infrastruktur yang

menghasilkan metana di berbagai bagian dunia, sehingga membatasi upaya mitigasi.

Peran satelit dalam sistem pengamatan global

Jumlah instrumen pengindraan metana yang mengorbit bumi makin meningkat, sehingga memberikan pandangan yang lebih luas dan lebih global tentang emisi metana serta menyediakan cakupan spasial dan temporal yang lebih baik. Sebagai contoh, pengamatan dari TROPOMI, instrumen pengindraan metana yang ada di satelit Sentinel-5P milik UE, telah memungkinkan studi terperinci tentang emisi regional di seluruh dunia, dari skala [benua](#) hingga [kota](#). Satelit pengindra sumber titik, termasuk GHGSat, EMIT, Sentinel-2, PRISMA, EnMAP, dan Gaofen 5, telah mengubah pemahaman kita tentang emisi metana dan menunjukkan prevalensi emisi besar dari kondisi operasi "abnormal" pada [operasi minyak dan gas](#) serta keberlanjutan emisi tersebut dari sektor lain, termasuk [batu bara](#) dan [limbah](#). Instrumen ini menemukan makin banyak lokasi dengan emisi besar yang persisten, yang dapat menjadi target mitigasi yang hemat biaya. Hebatnya, pengamatan semacam itu bahkan telah digunakan untuk mendorong mitigasi cepat atas emisi besar yang sebelumnya tidak terdeteksi tetapi mudah diperbaiki dari industri minyak dan [gas](#).

Dengan menggabungkan kelebihan masing-masing, beragam satelit ini meningkatkan kemampuan kita untuk menangani emisi metana. Pengamatan satelit fluks emisi wilayah yang luas menyoroti kekurangan dan celah pengetahuan dalam inventarisasi emisi yang ada dan membantu meningkatkan pemahaman kita tentang area dengan emisi tinggi. Dengan membandingkan emisi regional, pengamatan ini juga membantu mengukur dampak praktik dan regulasi produksi bahan bakar fosil yang berbeda terhadap emisi metana dan dapat mendasari pengembangan regulasi serta kesepakatan perdagangan. Pengamatan satelit pada skala fasilitas dapat membantu menemukan peristiwa emisi besar dan mendorong mitigasi secara cepat. Selain itu, pengamatan ini juga dapat mengidentifikasi sumber emisi dan menyoroti bagaimana praktik

operasi yang berbeda dapat memengaruhi emisi. Jika tersedia pengamatan yang cukup, pengamatan pada tingkat fasilitas ini dapat digunakan untuk memeriksa validitas laporan emisi fasilitas, sehingga meningkatkan transparansi dan membantu menegakkan kepatuhan terhadap regulasi.

Merancang strategi pengamatan metana yang efektif

Tidak ada satu teknologi pun yang dapat menangkap semua emisi metana secara efektif. Pilihan teknologi tergantung pada konteks spesifik. Sering kali, sistem pengamatan bertingkat—kombinasi berbagai metode pengukuran—diperlukan untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif tentang emisi dan untuk mendorong tindakan yang efektif. Satelit, dengan jangkauan global dan biaya relatif yang efisien, sangat cocok untuk menjadi tulang punggung sistem pengamatan semacam ini.

Berikut adalah beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan ketika merancang sistem tersebut.

Tujuan pemantauan metana: Tidak ada sistem pengamatan yang dapat menangkap semua aspek emisi metana, jadi perancang harus bertujuan untuk mengumpulkan data yang sesuai dengan aplikasi yang dimaksud. Jika tujuannya adalah menyediakan pengamatan independen dari atas ke bawah untuk memvalidasi dan menyempurnakan laporan emisi, maka cakupan satelit dengan frekuensi yang sering di wilayah luas sangat dibutuhkan. Untuk mendeteksi emisi abnormal dalam jumlah besar dari beberapa lokasi guna mendukung pelaporan metana, pemantauan satelit skala fasilitas mungkin sudah cukup. Namun, jika tujuannya adalah mendukung mitigasi emisi, pengamatan satelit harus dilengkapi dengan alat pemantauan lokal yang mampu mengidentifikasi sumber emisi secara tepat di dalam suatu fasilitas.

Karakteristik sumber emisi: Sistem pengamatan perlu disesuaikan dengan sumber yang akan dipantau. Misalnya, jika emisi diperkirakan bersifat tidak teratur, sistem harus memperkirakan pengamatan reguler untuk menangkap peristiwa yang jarang terjadi. Sebaliknya, jika emisi relatif konstan, pengamatan yang tidak terlalu sering mungkin sudah cukup.

Kondisi lingkungan: Seperti yang dijelaskan dalam laporan ini, faktor lingkungan, termasuk tutupan awan dan angin kencang, memengaruhi efektivitas deteksi metana oleh satelit. Dampak dari faktor-faktor ini bervariasi berdasarkan lokasi dan waktu dalam setahun. Semua teknik pengukuran akan dipengaruhi (dengan cara yang berbeda) oleh kondisi lingkungan, sehingga sistem pengamatan harus disesuaikan dengan kendala lokal tersebut.

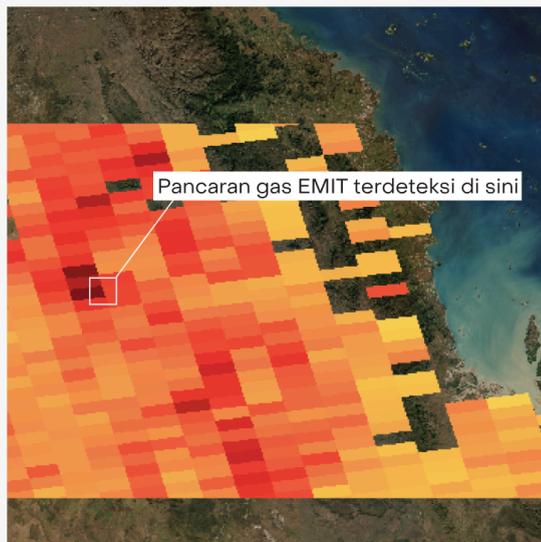
Ketersediaan dan biaya teknik pengukuran: Setiap sistem pengamatan harus dioptimalkan untuk memberikan manfaat maksimal mengingat keterbatasan sumber daya yang tersedia. Ketersediaan dan biaya berbagai teknologi pengamatan sangat bervariasi di setiap wilayah. Selain itu, sumber daya keuangan dan kapasitas pemangku kepentingan akan sangat bervariasi di seluruh dunia. Desain setiap sistem pengamatan harus mempertimbangkan hal ini.

Berbagai sensor satelit dapat digunakan secara kombinasi untuk menentukan lokasi dan mengukur emisi

Pengamatan metana dari instrumen TROPOMI dan EMIT di wilayah tambang batu bara New South Wales, Australia

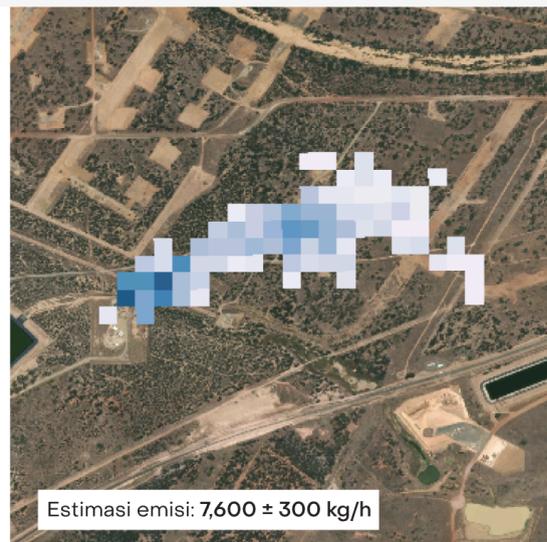
Konsentrasi metana TROPOMI dalam bagian per miliar (ppb)
19 Juli 2024

1,830 ppb 1,892 ppb



Peningkatan metana EMIT dalam bagian per juta (ppm-m)
17 Juli 2024

896 ppm-m 9,041ppm-m



Sumber: Data TROPOMI berasal dari Sentinel-5p, Konsentrasi metana EMIT dan estimasi emisi sumber titik berasal dari Carbon Mapper

EMBER

Keterbatasan lingkungan dalam pemantauan metana berbasis satelit

Laporan ini bertujuan untuk menunjukkan bahwa meskipun satelit memberikan manfaat besar, satelit akan menjadi kurang efektif dalam pemantauan metana di beberapa lokasi karena kondisi lingkungan tidak akan memungkinkan satelit dalam menjangkau setiap bagian dunia dengan konsistensi dan frekuensi yang diperlukan untuk sepenuhnya mendukung upaya mitigasi global. Sebagai contoh:

- tutupan awan yang persisten akan mengurangi cakupan data satelit di wilayah tropis;

- selama musim dingin, dengan matahari yang tetap rendah di atas cakrawala, wilayah berlintang tinggi akan tetap relatif redup, sehingga mengurangi cahaya yang diperlukan untuk mengamati metana dengan efektif dan meningkatkan ambang deteksi satelit yang sudah besar;
- angin kencang dan permukaan gelap, seperti hutan, dapat membuat peristiwa emisi besar sulit diamati;
- medan terjal di wilayah pegunungan akan menyulitkan atau bahkan membuat interpretasi pengukuran satelit menjadi mustahil, sehingga menciptakan hambatan sepanjang tahun untuk pengamatan metana yang andal di area tersebut.

Keragaman instrumen berbasis ruang angkasa tentu saja berarti bahwa faktor-faktor ini akan memengaruhi kemampuan instrumen secara berbeda, dan, sampai batas tertentu, sistem pengamatan yang menggabungkan beberapa sensor berbasis ruang angkasa akan meningkatkan pengamatan emisi metana di banyak bagian dunia. Namun, tantangan yang disebabkan oleh faktor lingkungan dapat menyebabkan berkurangnya cakupan data di wilayah tertentu.

Dalam laporan ini, kami memetakan dampak regional dari berbagai parameter lingkungan yang memengaruhi penginderaan metana dari ruang angkasa. Untuk itu, kami mengkaji dampak gabungan dari lima parameter: tutupan awan, elevasi matahari, reflektivitas permukaan, medan yang tidak rata, dan kecepatan angin. Laporan ini menunjukkan di mana satu atau lebih dari parameter tersebut diperkirakan akan menghambat beberapa pengamatan satelit selama sebagian besar tahun. Dalam banyak kasus, lokasi-lokasi ini masih dapat diamati, tetapi ketersediaan data akan lebih terbatas—hanya tersedia dari sebagian satelit pemantau metana dan/atau hanya dapat diperoleh secara tidak rutin. Dengan memetakan dampak ini, kami bertujuan untuk membantu pemerintah, akademisi, dan pemangku kepentingan lainnya dalam membangun ekspektasi yang realistis tentang ketersediaan data satelit di wilayah mereka dan merencanakan sistem pengamatan metana terintegrasi.



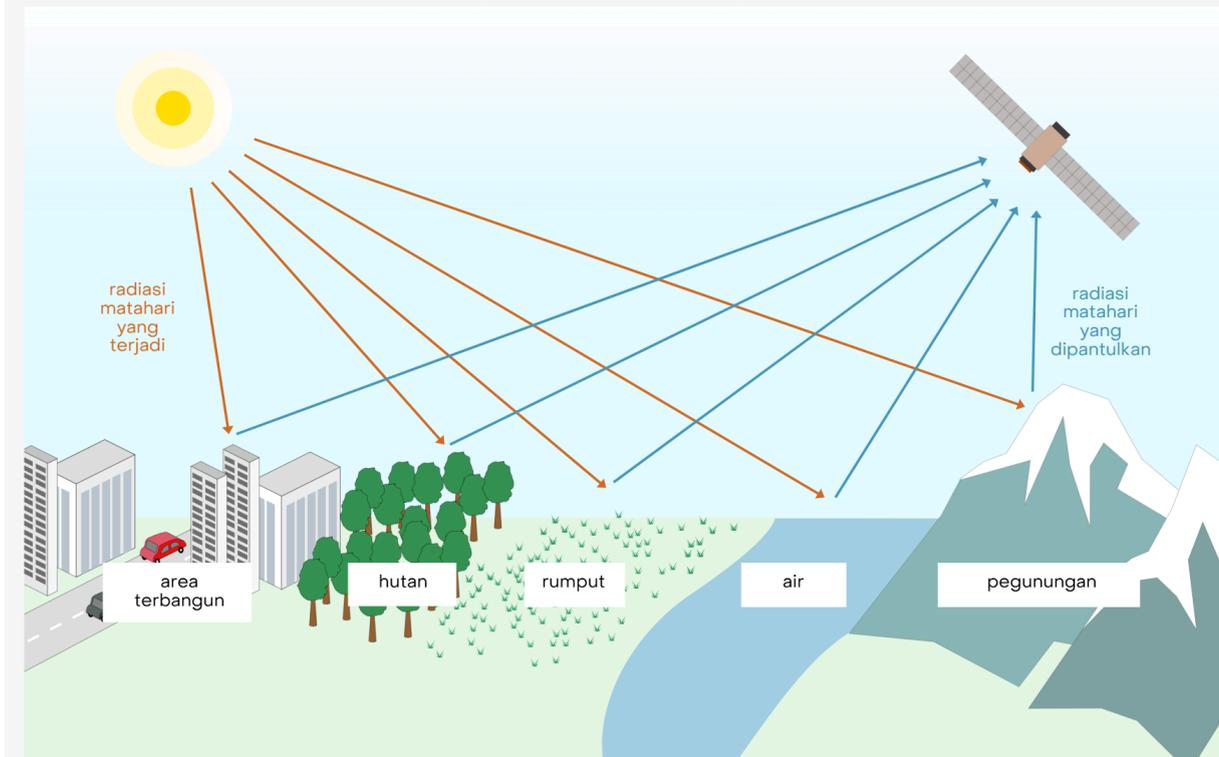
2. Kondisi lingkungan yang menantang

Kondisi lingkungan dapat mengganggu pengukuran metana melalui satelit

Faktor lingkungan lokal, mulai dari tutupan awan hingga medan yang sulit, dapat membatasi kemampuan satelit untuk mendeteksi metana, sehingga menyoroti perlunya pengukuran alternatif di area tertentu.

Meskipun tidak terlihat oleh mata manusia, metana menyerap radiasi inframerah dan dapat diamati dengan kamera khusus. Instrumen semacam itu kini dipasang pada satelit yang mengamati cahaya matahari yang melewati atmosfer, memantul dari permukaan bumi, dan bergerak kembali menuju ruang angkasa, seperti yang digambarkan dalam gambar berikut. Instrumen ini disetel untuk mencari pola penyerapan khusus pada cahaya ini yang berfungsi sebagai tanda metana di atmosfer. Algoritma khusus kemudian digunakan untuk mempertimbangkan banyak faktor lain yang dapat memengaruhi jumlah radiasi yang mencapai satelit dan menyimpulkan jumlah metana yang ada di jalur cahaya tersebut.

Instrumen satelit mengamati cahaya matahari yang dipantulkan dari permukaan bumi dan mencari tanda serapan metana



Sumber: Ember

EMBER

Beberapa faktor lingkungan dapat menghalangi cahaya matahari mencapai sensor satelit dan ini akan membuat deteksi metana lebih sulit atau bahkan mustahil. Faktor lain, seperti angin kencang, dapat menyebar dan menipiskan metana di atmosfer, yang juga menghambat deteksi metana.

Dampak kondisi lingkungan tergantung pada satelit

Tidak semua satelit terpengaruh di tingkat yang sama oleh kondisi lingkungan yang beragam. Cara pasti kondisi ini memengaruhi kemampuan satelit untuk mengukur dan menghitung emisi metana akan bervariasi tergantung pada karakteristik khusus setiap instrumen. Misalnya, instrumen yang dibangun untuk mendeteksi perubahan konsentrasi metana di area luas akan sangat dipengaruhi bahkan oleh beberapa awan di area yang dipelajari. Sementara itu, satelit resolusi tinggi, yang mencoba mendeteksi emisi dari fasilitas di area yang sama, mungkin dapat melihat di antara awan yang terputus dan mengamati fasilitas tersebut.

Para peneliti telah lama mempelajari cara-cara kondisi pengamatan akan memengaruhi berbagai instrumen satelit yang mendeteksi metana. Misalnya, penelitian terbaru [menyoroti](#) dampak dramatis dari ukuran piksel sensor terhadap kemampuannya untuk mengamati metana di wilayah tropis. Peneliti lainnya [mempelajari](#) secara terperinci faktor-faktor yang membatasi kemampuan instrumen tertentu (TROPOMI) untuk mengamati metana di seluruh dunia.

Laporan ini merangkum studi-studi tersebut dan menyoroti pola-pola lebih luas yang memengaruhi pengamatan satelit metana dengan cara tertentu, tanpa fokus pada karakteristik instrumen tertentu.

Oleh karena itu, kami mengklasifikasikan kondisi pengamatan menggunakan kategori umum, yaitu 'menguntungkan', 'sedang', dan 'sulit', untuk menyoroti kondisi yang secara luas tidak menguntungkan untuk pengamatan satelit. Dalam kondisi "menguntungkan"—langit bebas awan dan permukaan yang relatif datar dan cerah—satelit diperkirakan akan berfungsi sebaik mungkin. Ketika suatu area ditandai memiliki kondisi 'sedang', sumber metana mungkin sering tertutup awan dan medan yang kompleks yang mungkin menghentikan satelit untuk mendeteksi beberapa gumpalan gas yang seharusnya bisa terdeteksi dengan mudah. Dalam kondisi "sulit", deteksi metana mungkin menjadi mustahil dilakukan untuk beberapa sensor atau dapat terjadi dalam kondisi langka dan/atau ketika ada gumpalan gas yang sangat besar.

Dampak pasti dari kondisi lingkungan ini pada satelit tertentu harus dipelajari secara terpisah untuk setiap kasus penggunaan dan lokasi.

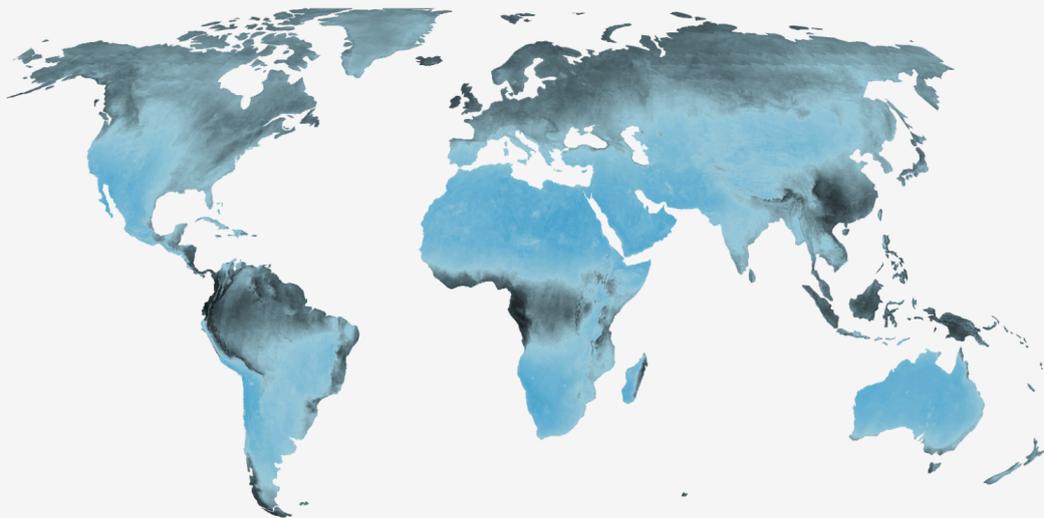
Kondisi lingkungan dan dampaknya

Laporan ini mempertimbangkan faktor lingkungan berikut dan dampaknya terhadap kemampuan satelit untuk mendeteksi metana secara efektif.

Tutupan awan

Awan menyembunyikan metana dari pandangan satelit

Satelit pendeteksi metana tidak dapat menembus awan. Di wilayah tropis, yang memiliki tutupan awan persisten, hal ini membuat pengukuran metana sulit dilakukan sepanjang tahun.



Sumber: Rata-rata tahunan Cloud Score+ dari Google Earth Engine

EMBER

Tutupan awan merupakan [hambatan paling signifikan](#) dalam pendeteksian metana dari luar angkasa karena satelit metana tidak dapat melihat menembus

awan. Karena awan jauh lebih terang daripada permukaan bumi, bahkan sebuah awan kecil yang menutupi sebagian piksel satelit akan mengganggu pengukuran dan menghentikan satelit dalam mendeteksi metana. Di beberapa wilayah dengan tutupan awan yang persisten, seperti daerah tropis, hal ini dapat menghambat satelit dari mendeteksi metana sepanjang tahun.

Karakteristik satelit, seperti resolusi spasialnya, akan sangat memengaruhi sejauh mana pengaruh awan terhadap kemampuannya untuk memantau metana. Misalnya, satelit resolusi tinggi, yang dibangun untuk memantau metana dari fasilitas individual, mungkin dapat mendeteksi metana di antara awan yang terputus, meskipun tetap terdapat tantangan dalam observasi ini. Sebaliknya, satelit yang dibangun untuk mengukur metana di wilayah yang lebih luas, jika menghadapi tutupan awan yang sama, mungkin tidak pernah mendapatkan pandangan yang sepenuhnya bebas awan, yang dibutuhkan untuk melakukan pengukuran.

Kekasaran medan

Pegunungan membuat interpretasi pengamatan satelit menjadi sangat sulit

Medan yang terjal membuat interpretasi sinyal yang diterima oleh satelit menjadi lebih rumit.



Sumber: Berdasarkan model elevasi digital GMTED2010

EMBER

Beberapa satelit mengalami kesulitan untuk memperkirakan metana di [medan pegunungan](#). Tanah yang tidak rata di wilayah tersebut akan menciptakan bayangan di sebagian pemandangan yang diamati, sehingga sulit untuk menginterpretasikan jumlah cahaya yang mencapai satelit. Seiring cahaya memantul dari berbagai bagian medan yang tidak rata, cahaya tersebut akan mencapai satelit setelah melewati bagian-bagian atmosfer yang berbeda dan makin memperumit interpretasi sinyal satelit. Kombinasi faktor-faktor ini

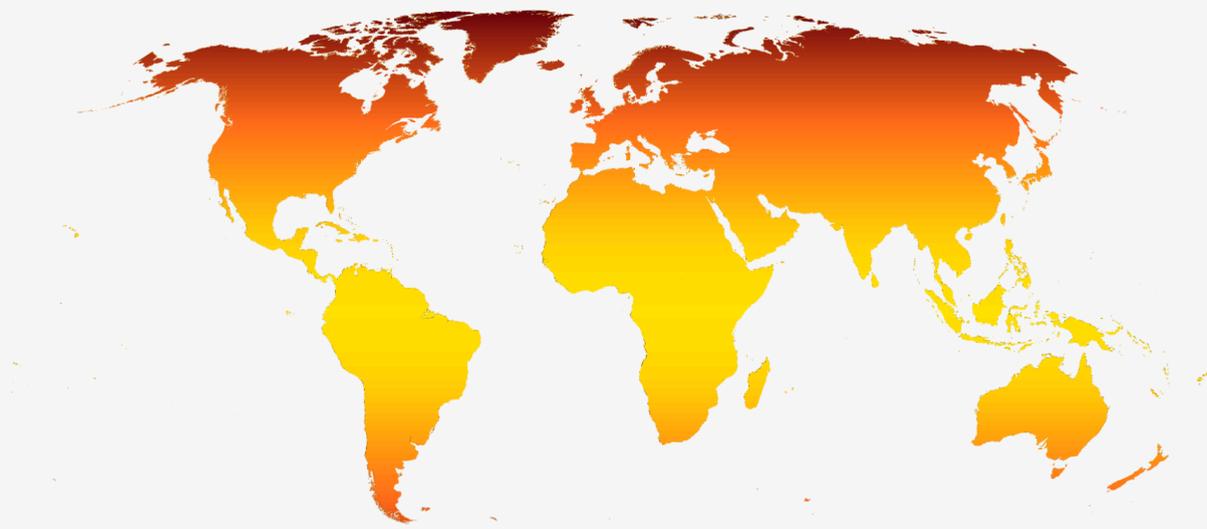
menjadikan medan kasar sebagai hambatan sepanjang tahun untuk pendeteksian metana. Seperti yang ditunjukkan dalam peta, hal ini dapat memengaruhi sebagian besar dunia, termasuk Asia Tengah, Amerika Selatan bagian barat, Amerika Utara bagian tengah, dan Balkan barat.

Seperti halnya awan, cara parameter ini memengaruhi berbagai sensor satelit akan sangat bergantung pada karakteristik sensornya. Sensor resolusi tinggi mungkin dapat menghitung metana di area datar kecil di sekitar fasilitas, sementara satelit pemantau area mungkin mengalami kesulitan untuk memperkirakan emisi metana di wilayah pegunungan yang lebih luas.

Elevasi matahari

Rendahnya elevasi matahari menghambat pengukuran metana di garis lintang tinggi

Di garis lintang utara, matahari tidak akan naik tinggi di atas cakrawala selama beberapa bulan. Pada periode ini, permukaan tanah akan lebih redup dibandingkan periode musim panas ketika matahari lebih tinggi di langit. Ketika cahaya yang menyinari permukaan lebih sedikit, lebih sedikit pula cahaya yang dipantulkan kembali ke sensor.



Sumber: Rata-rata elevasi matahari tahunan

EMBER

Sebagian besar satelit pendeteksi metana yang digunakan untuk mempelajari konsentrasi metana dekat permukaan memerlukan cahaya matahari yang terang agar dapat berfungsi secara efektif. Namun, cahaya yang cukup tidak selalu tersedia. Selama musim dingin di lintang tinggi, misalnya, matahari tidak terbit tinggi di atas cakrawala dan menyebabkan sebagian besar permukaan

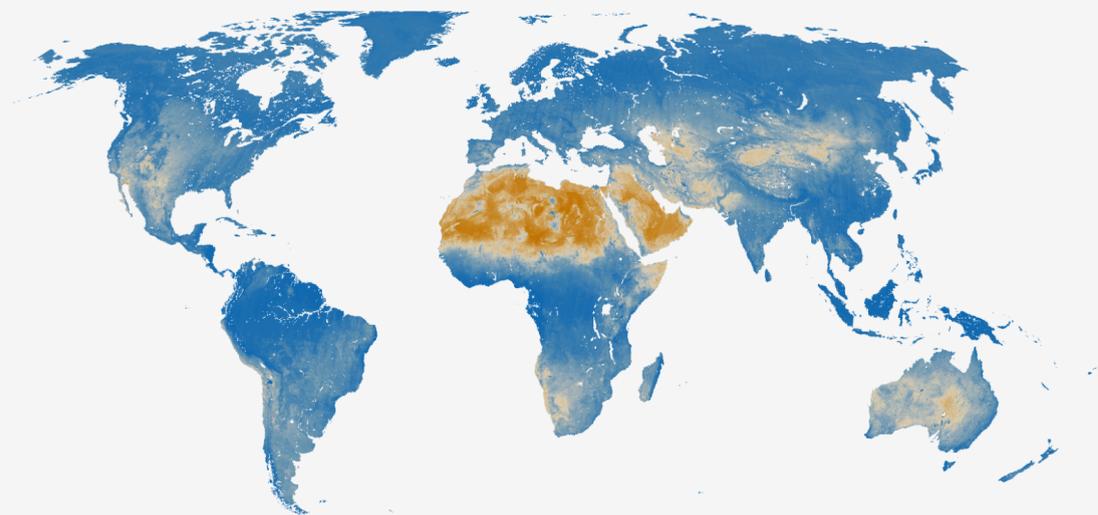
bumi kurang terang selama beberapa bulan. Akibatnya, cakupan data dapat berkurang secara signifikan selama musim dingin untuk [beberapa sensor](#). Beberapa bagian dari Rusia, Kanada, dan Argentina sangat terpengaruh oleh parameter ini.

Dampak pasti dari kondisi cahaya rendah pada setiap instrumen pendeteksi metana akan bergantung pada desainnya. Instrumen yang dioptimalkan untuk beroperasi dalam kondisi cahaya rendah mungkin kurang terpengaruh, tetapi tetap akan terdampak secara negatif. Orbit satelit, yang menentukan waktu lokal saat satelit akan mengorbit di atas suatu lokasi, juga akan memengaruhi dampak dari parameter ini pada instrumen tertentu.

Kecerahan permukaan

Permukaan gelap membuat metana lebih sulit dideteksi

Mendeteksi metana menjadi tantangan di permukaan gelap, seperti hutan, tanah basah kosong, dan air, karena permukaan tersebut tidak memantulkan cukup cahaya matahari kembali ke satelit. Salju juga tampak gelap pada gelombang inframerah-pendek yang umumnya digunakan untuk mendeteksi metana.



Sumber: Rata-rata tahunan reflektansi permukaan, yang diambil dari data Sentinel-2 yang dimodifikasi, diproses menggunakan Google Earth Engine.

EMBER

Permukaan lahan yang gelap, seperti hutan, tidak akan memantulkan cukup cahaya kembali ke sensor satelit, sehingga dapat menyebabkan [ketidakpastian lebih tinggi](#). Seperti halnya elevasi matahari yang rendah, hal ini mungkin membuat deteksi penyerapan metana menjadi sulit. Daerah yang tertutup salju juga sebagian besar tampak gelap dalam gelombang inframerah pendek yang digunakan untuk mendeteksi metana. Efek ini dapat dilihat dengan mudah di

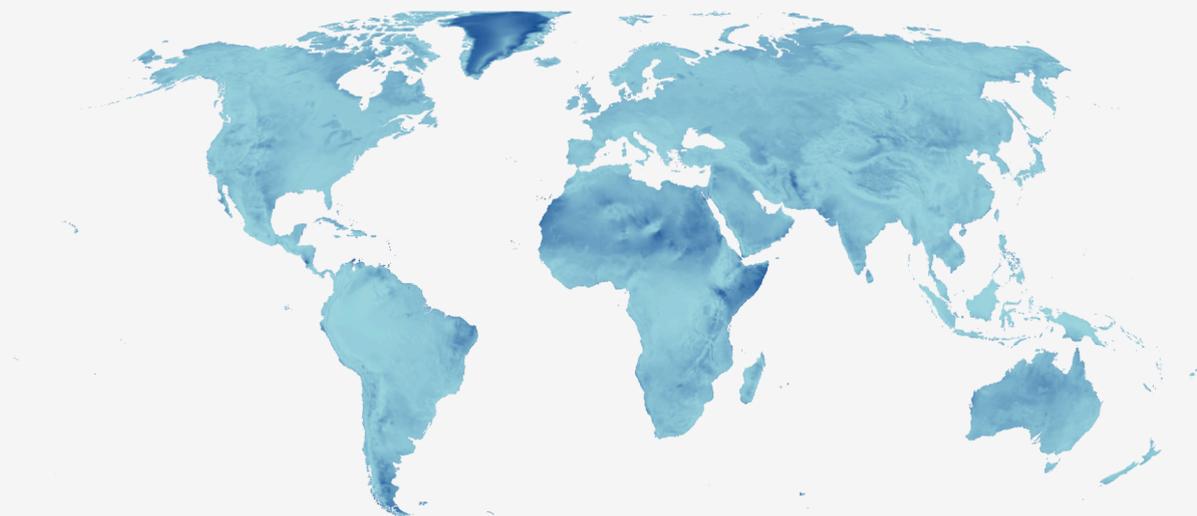
atas hutan tropis dan daerah tertutup salju di lintang tinggi. Sebaliknya, wilayah tandus akan memantulkan cahaya yang melimpah dan menguntungkan untuk deteksi metana.

Permukaan air daratan dan laut dikecualikan dalam studi kami karena dalam kebanyakan kasus terlalu gelap untuk digunakan dalam pengambilan data metana. Perlu dicatat bahwa teknik baru sedang dikembangkan untuk menyesuaikan sudut pandang sensor untuk meningkatkan cahaya matahari yang dipantulkan dari air (kilau matahari). Teknik ini dapat menawarkan informasi yang bernilai, misalnya untuk [produksi minyak dan gas lepas pantai](#), tetapi tidak termasuk dalam laporan ini. Untuk beberapa instrumen, permukaan yang terlalu terang juga menjadi tantangan karena jumlah cahaya yang besar dapat membutakan sensor. Karena ini jarang terjadi, efek ini tidak diperhitungkan dalam studi kami.

Kecepatan angin

Angin menyebarkan pancaran gas metana, sehingga membuatnya lebih sulit untuk dideteksi

Setelah metana dilepaskan ke atmosfer, angin akan membawanya menjauh dari sumber dan membentuk sebaran gas metana. Kecepatan angin yang tinggi dapat menyebabkan pancaran gas lebih cepat tersebar ke area yang lebih luas, sehingga konsentrasi metana di setiap lokasi berkurang dan lebih sulit dideteksi.



Sumber: Berdasarkan data ERA5-Land

EMBER

Angin kencang dapat menyebarkan metana jauh dari sumbernya dengan cepat, sehingga mengurangi konsentrasi lokal dan mempersulit satelit dalam membedakan gumpalan gas dari konsentrasi metana latar. Meskipun sejumlah angin diperlukan untuk pembentukan kepulan dan kuantifikasinya, secara umum,

kecepatan angin yang lebih tinggi dikaitkan dengan [ambang deteksi yang lebih tinggi](#).

Di wilayah dengan angin kencang yang persisten, seperti di Argentina selatan, satelit hanya akan dapat mendeteksi gumpalan gas yang lebih besar dibandingkan dengan wilayah dengan kondisi angin yang lebih ringan.

Kondisi angin akan memiliki dampak yang lebih besar pada satelit pemetaan pancaran gas resolusi tinggi karena pancaran gas metana akan cepat tersebar oleh angin kencang. Satelit dengan resolusi kasar, yang bertujuan untuk memetakan metana di wilayah yang lebih luas, akan lebih sedikit terpengaruh oleh kondisi angin.

Metodologi kami

Lima faktor lingkungan ini, dan perubahannya sepanjang tahun, telah dipelajari untuk mengeksplorasi kelayakan lokasi guna mendukung pengamatan metana. Pertama, dampak setiap faktor lingkungan untuk setiap bulan dipelajari secara terpisah. Secara spesifik, kami menerapkan ambang batas untuk setiap faktor untuk menentukan apakah kondisi pada waktu dan lokasi tertentu adalah 'menguntungkan', 'sedang', atau 'sulit' untuk pengamatan (lihat Lampiran untuk deskripsi terperinci tentang ambang batas dan dataset input yang digunakan). Kedua, kami menghitung dampak gabungan dari semua parameter untuk setiap bulan. Jika ada input yang termasuk dalam kategori 'sulit', bulan tersebut akan diklasifikasikan sebagai sulit. Demikian pula, jika ada input yang dikategorikan sebagai 'sedang' tetapi tidak ada yang dikategorikan sebagai 'sulit', skor akhirnya akan 'sedang'. Untuk mendapatkan skor 'menguntungkan', semua input harus berada dalam kategori 'menguntungkan'. Hasilnya adalah klasifikasi bulanan untuk setiap lokasi di seluruh dunia.

Seperti yang disebutkan sebelumnya, kategori yang ditetapkan hanya boleh digunakan sebagai indikator kasar dari area - area yang kemungkinan memiliki keterbatasan pengamatan metana oleh satelit. Analisis kami bersifat konservatif dalam arti bahwa kami mengidentifikasi area dan periode waktu dalam setahun di mana setidaknya beberapa sensor satelit diperkirakan kurang mampu atau tidak dapat memantau metana. Kategori ini tidak, misalnya, menangkap bagaimana kondisi lingkungan berbeda memengaruhi instrumen yang dirancang untuk memantau emisi skala fasilitas versus yang dimaksudkan untuk mengukur emisi di area yang lebih luas. Di area yang diberi label 'sedang' atau 'sulit' untuk dipantau, pengguna perlu berhati-hati karena beberapa satelit yang mungkin sangat berguna untuk kondisi tersebut, mungkin tidak berfungsi seperti yang diharapkan.

Selanjutnya, kami menyelidiki dampak faktor lingkungan ini pada infrastruktur ekstraksi batu bara, minyak, dan gas, yang menyebabkan emisi metana dalam jumlah yang besar.



3. Kesulitan dalam memantau wilayah tertentu

Sebagian besar wilayah dapat dipantau dengan baik menggunakan satelit, tetapi beberapa wilayah tetap menjadi tantangan

Tujuh puluh persen lokasi ekstraksi bahan bakar fosil berada di wilayah yang kondusif untuk pengamatan satelit selama sebagian besar bulan dalam setahun, sedangkan 30% berada di area yang diklasifikasikan sebagai 'sedang' atau 'sulit' untuk diamati. Jumlah fasilitas di wilayah ini sangat bervariasi di setiap negara.

Kondisi lingkungan yang memengaruhi pemantauan satelit di seluruh dunia sangat beragam. Wilayah yang kami klasifikasikan sebagai menantang—yang kondisinya 'sedang' atau 'sulit' selama paling sedikit 6 bulan per tahun—umumnya berada di daerah tropis, terutama karena tutupan awan yang persisten, serta di lintang tinggi yang menghadapi tantangan tambahan berupa kurangnya cahaya selama musim dingin. Wilayah pegunungan dengan medan terjal di Asia Timur, Amerika Barat, dan Eropa juga sulit diamati, terutama oleh satelit pemetaan area.

Sebaliknya, wilayah yang relatif kering seperti Afrika Utara, Asia Tengah, Australia, dan bagian selatan AS cenderung memiliki kondisi pengamatan yang ideal sepanjang tahun. Tidak mengherankan, banyak studi awal berbasis satelit yang membangun pemahaman kita tentang emisi metana difokuskan pada wilayah-wilayah kering ini.

Berdasarkan data produksi dari [Global Coal Mine Tracker \(GCMT\)](#), analisis kami menunjukkan bahwa 30% produksi batu bara terjadi di wilayah yang sulit diamati. Untuk minyak dan gas darat, data dari [Global Oil and Gas Extraction Tracker](#) menunjukkan bahwa 29% produksi global berada di wilayah yang sulit untuk dipantau.

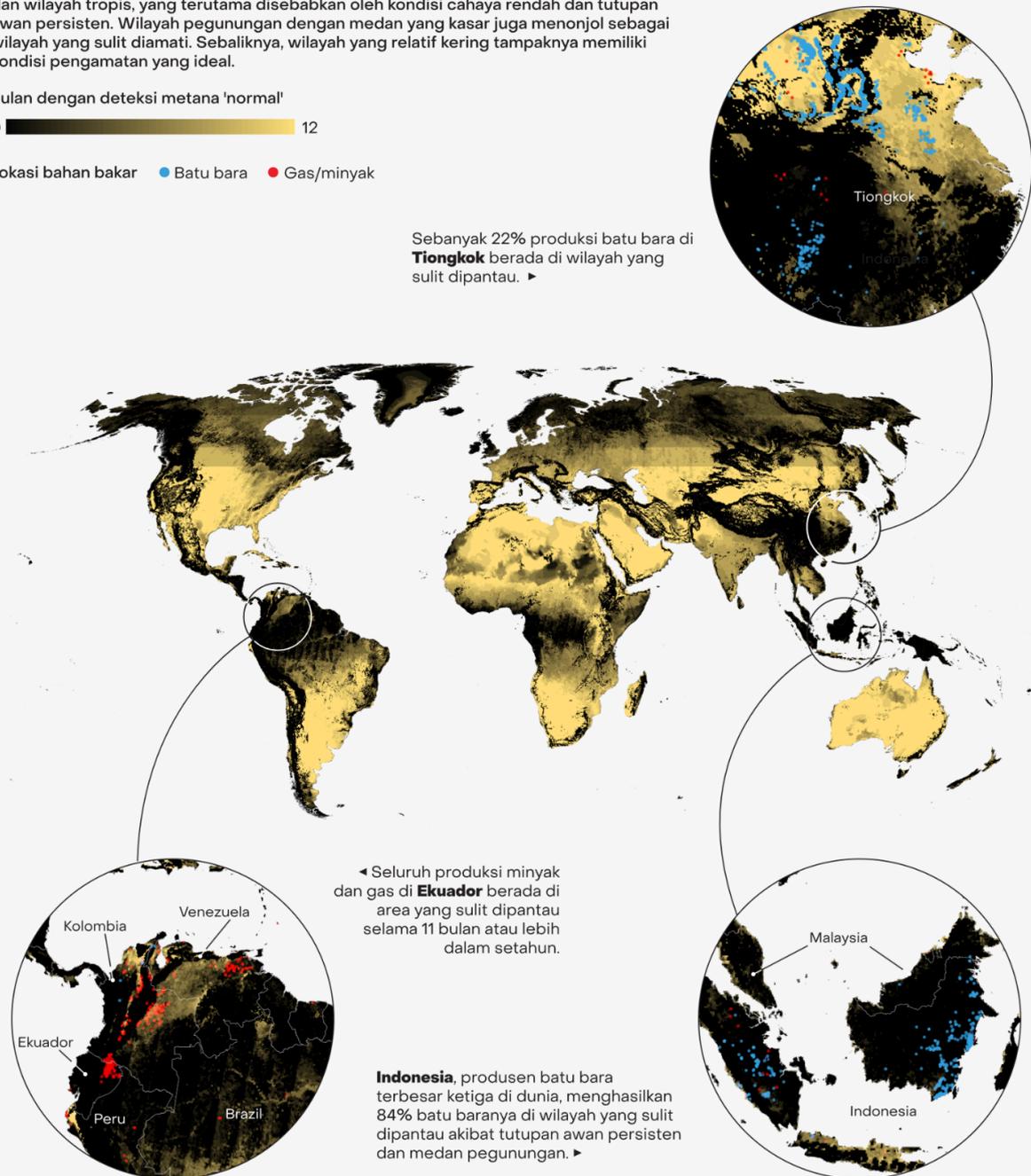
Dampak gabungan dari faktor lingkungan menghambat satelit dalam memantau emisi metana secara efektif di beberapa bagian dunia

Analisis kami mengungkapkan beberapa wilayah yang sulit diamati di garis lintang tinggi dan wilayah tropis, yang terutama disebabkan oleh kondisi cahaya rendah dan tutupan awan persisten. Wilayah pegunungan dengan medan yang kasar juga menonjol sebagai wilayah yang sulit diamati. Sebaliknya, wilayah yang relatif kering tampaknya memiliki kondisi pengamatan yang ideal.

Bulan dengan deteksi metana 'normal'



Lokasi bahan bakar • Batu bara • Gas/minyak



Sumber: Lokasi tambang batu bara berasal dari Global Coal Mine Tracker, Global Energy Monitor, Rilis April 2024., Lokasi situs minyak dan gas berasal dari Global Oil and Gas Extraction Tracker, Global Energy Monitor, Rilis Maret 2024.



Peta interaktif yang menunjukkan kategori deteksi metana dari setiap aset bahan bakar fosil, yang bervariasi setiap bulan, dapat diakses secara [daring](#).

Skor tingkat kesulitan deteksi untuk pengukuran metana oleh satelit

Kategori deteksi metana

■ Difficult ■ Moderate ■ Favourable



Sumber: Lokasi tambang batu bara berasal dari Global Coal Mine Tracker, Global Energy Monitor, Rilis April 2024. Lokasi tambang batu bara berasal dari Global Coal Mine Tracker, Global Energy Monitor, Rilis April 2024., Lokasi situs minyak dan gas berasal dari Global Oil and Gas Extraction Tracker, Global Energy Monitor, Rilis Maret 2024., Peta dasar: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, dan Komunitas Pengguna GIS

EMBER

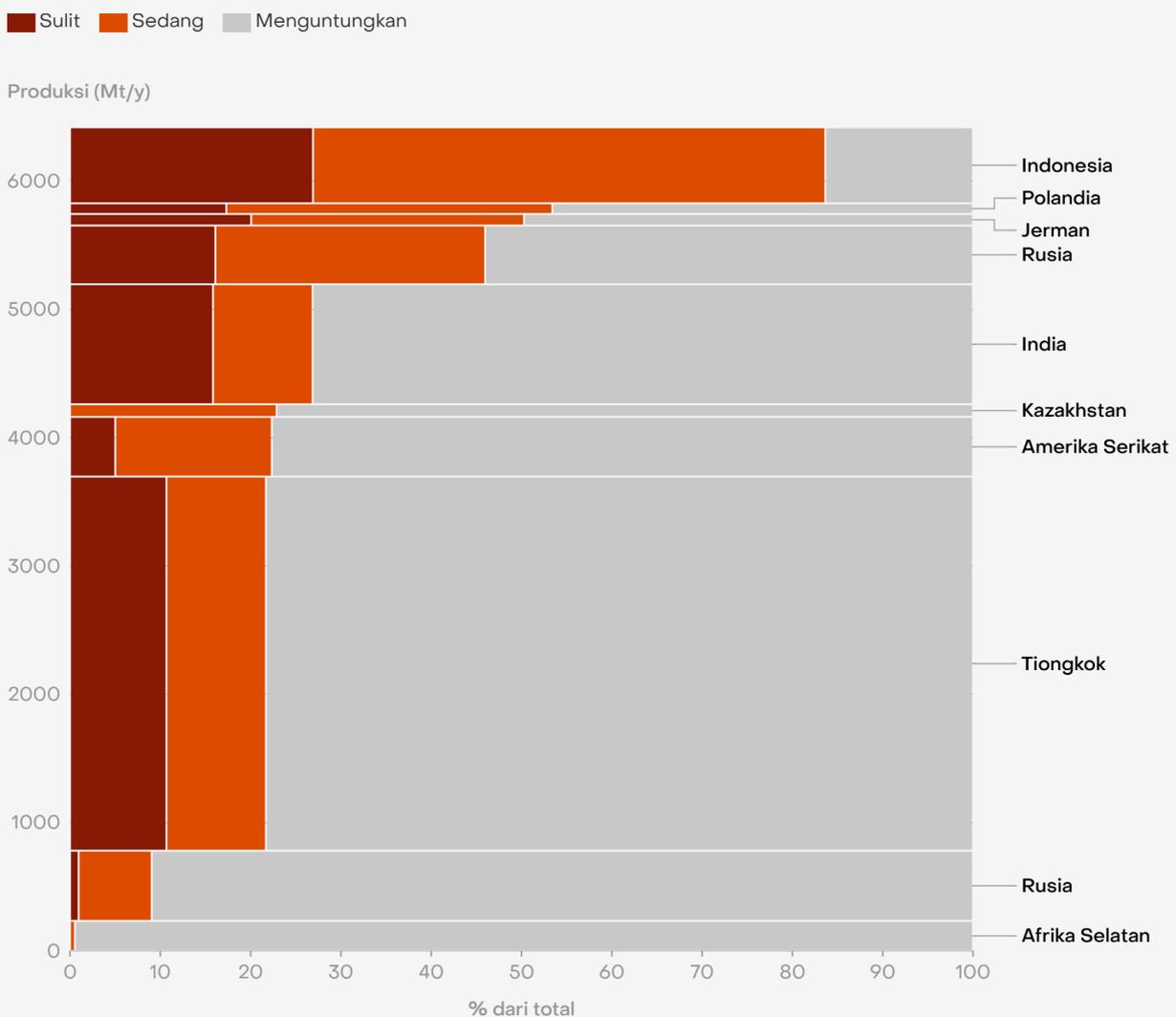
Perbedaan antarnegara dalam kemudahan pemantauan satelit terhadap produksi batu bara

Analisis terhadap 10 negara penghasil batu bara terbesar menunjukkan bahwa kondisi pemantauan metana berbasis satelit hampir ideal di Afrika Selatan, yang

produksi batu baranya terjadi di bawah kondisi yang menguntungkan, dan di Australia, yang sebanyak 91% produksi batu baranya berlangsung di wilayah yang kondusif. Sebaliknya, sebagian besar produksi batu bara di wilayah yang sulit dipantau terkonsentrasi di beberapa bagian Tiongkok, Indonesia, India, Rusia, dan Amerika Serikat. Wilayah sulit diamati didefinisikan sebagai area dengan kategori 'sulit' atau 'sedang' selama 6 bulan atau lebih.

Kesepuluh produsen batu bara terbesar memiliki tambang di lokasi yang metananya sulit dipantau satelit

Sepuluh produsen batu bara terbesar, diurutkan berdasarkan persentase produksi mereka yang berlokasi di wilayah yang metananya sulit dideteksi oleh satelit.



Sumber: Data produksi batu bara bersumber dari suplemen September 2024 dari Coal Mine Tracker oleh Global Energy Monitor.



Tiongkok

Sebanyak 22% dari produksi batu bara Tiongkok, yang mencapai 633 ton per tahun, berada di wilayah yang sulit dipantau. Sebagian besar tambang berlokasi di barat daya Tiongkok, yang tutupan awan dan medan terjalnya menyebabkan kondisi menantang untuk pemantauan metana, terutama untuk satelit pemantauan area.

Indonesia

Menariknya, Indonesia menempati [urutan ketiga sebagai produsen batu bara terbesar](#) di dunia, tetapi 84% produksi batu bara terletak di daerah yang sulit untuk dipantau. Ini berarti terdapat 496 juta ton produksi batu bara per tahun yang mungkin tidak terpantau. Sebagian besar tambang batu bara tersebar di Sumatera dan Kalimantan. Hambatan dalam pemantauan di kedua wilayah tersebut disebabkan oleh tutupan awan yang persisten dan medan pegunungan.

India

Sebanyak 27% produksi batu bara India, yang berjumlah 251 ton per tahun, berada di wilayah yang sulit untuk dipantau selama beberapa bulan dalam setahun. Hal ini disebabkan oleh tutupan awan selama musim monsun pada bulan Juli-Agustus yang dapat berdampak pada pemantauan satelit.

Rusia

Di Rusia, 46% produksi batu bara, setara dengan 211 juta ton per tahun, berada di wilayah yang sulit dipantau. Pemantauan metana oleh satelit dapat menjadi tantangan akibat rendahnya ketinggian matahari dan tutupan awan musiman.

Amerika Serikat

Sebanyak 22% produksi batu bara AS berada di wilayah sulit diamati, yaitu sekitar 104 juta ton per tahun. Di wilayah penambangan batu bara Cekungan Interior Barat, kondisi sulit disebabkan oleh medan terjal Pegunungan Rocky. Di Cekungan Appalachian, tantangan muncul akibat kombinasi medan pegunungan

(Pegunungan Appalachian), tutupan awan intermiten, dan permukaan yang gelap.

Wilayah tambang batu bara lain yang sulit diamati

Terdapat klaster wilayah tambang batu bara lain yang sulit dipantau. Salah satu klaster tersebut ditemukan di Balkan barat—khususnya di Bosnia dan Herzegovina, Serbia, dan Makedonia Utara. Tambang ini terletak di Pegunungan Alpen Dinari, yang medan pegunungannya membuat pemantauan metana oleh satelit menjadi tantangan, terutama untuk pemetaan fluks area.

Perbedaan antarnegara dalam kemudahan pemantauan satelit terhadap produksi minyak dan gas

Analisis terhadap 10 negara penghasil minyak dan gas terbesar menunjukkan bahwa kondisi pemantauan metana berbasis satelit hampir ideal di Arab Saudi, yang 100% produksi minyak dan gasnya berlangsung di bawah kondisi yang menguntungkan, dan di Aljazair, yang 99% produksinya berada di wilayah kondusif.

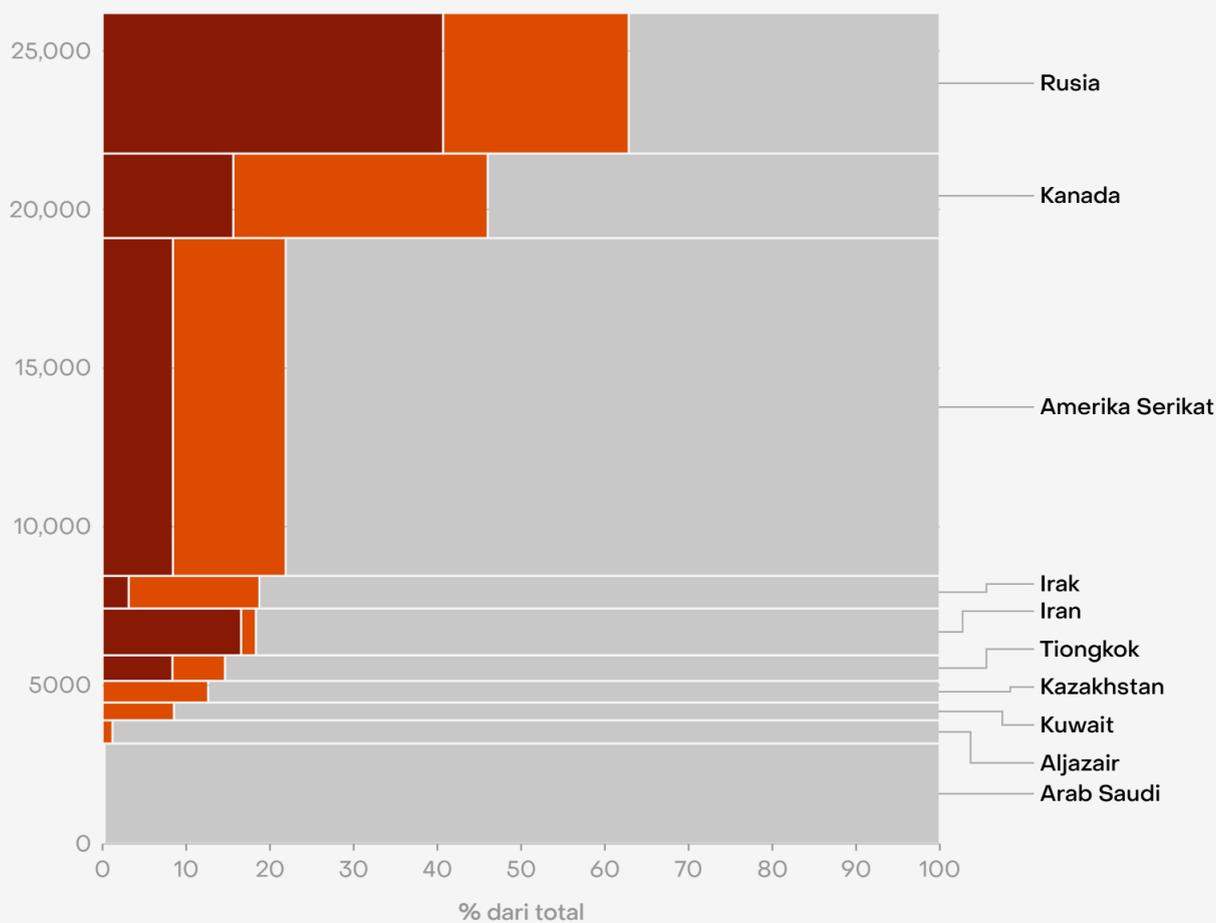
Sebagian besar produksi minyak dan gas di wilayah yang sulit dipantau terkonsentrasi di beberapa bagian Rusia, Kanada, dan Amerika Serikat.

Banyak situs ekstraksi minyak dan gas berada di lokasi yang metananya sulit dideteksi satelit

Sepuluh produsen minyak dan gas terbesar, diurutkan berdasarkan persentase produksi mereka yang berlokasi di wilayah yang metananya sulit untuk dideteksi satelit

■ Difficult ■ Moderate ■ Favourable

Production (million boe/y)



Sumber: Produksi minyak dan gas berasal dari Global Oil and Gas Extraction Tracker, Global Energy Monitor, Rilis Maret 2024.

EMBER

Rusia

Di Rusia, 62% produksi minyak dan gas negara berada di wilayah yang sulit dipantau. Sebagian besar lokasi produksi minyak dan gas yang sulit dipantau di Rusia berkelompok di Cekungan Siberia Barat, yang merupakan wilayah penghasil minyak dan gas terbesar di Rusia dengan cadangan hidrokarbon yang melimpah. Pemantauan lokasi-lokasi ini menjadi tantangan selama beberapa bulan setiap tahunnya karena rendahnya posisi matahari di musim dingin, seringnya tutupan awan, dan permukaan gelap yang muncul secara berkala.

Amerika Serikat

Di Amerika Serikat, 22% dari total produksi terjadi di wilayah yang sulit dipantau. Lokasi-lokasi ini tersebar di beberapa area. Klaster pertama terletak di Alaska, yang mencakup North Slope dan Teluk Alaska. Lokasi ini berada di garis lintang di atas 59,7 °LU, sehingga kondisi pemantauannya sangat dipengaruhi oleh kurangnya sinar matahari. Klaster kedua berada di Cekungan Appalachian, yang sulit untuk dipantau karena kombinasi tutupan awan yang muncul secara berkala dan permukaan gelap yang dapat mengganggu pengamatan satelit. Selain itu, terdapat klaster-klaster yang lebih kecil, seperti di Cekungan Ventura, sebelah utara Los Angeles. Di wilayah ini, medan terjal Pegunungan Transverse dapat menimbulkan tantangan bagi satelit dengan resolusi spasial yang kasar.

Kanada

Di Kanada, 46% produksi minyak dan gas berada di wilayah yang sulit dipantau. Wilayah ini ditemukan di sepanjang sisi timur Pegunungan Rocky, yang memiliki medan yang terjal, sehingga membuat pemantauan menjadi sulit, terutama untuk sensor satelit beresolusi kasar. Di sebelah timur Pegunungan Rocky, di Cekungan Alberta, kondisi menjadi sulit karena kombinasi posisi matahari yang rendah, tutupan awan, dan periode sporadis ketika permukaan tampak gelap.

Iran dan Irak

Baik Iran maupun Irak memiliki 19% produksi minyak dan gas di wilayah yang sulit dipantau. Di Iran, lokasi produksi ini terletak di Lipatan Zagros, sebuah wilayah

utama produksi minyak dan gas. Medan terjal Pegunungan Zagros menimbulkan tantangan signifikan bagi pemantauan satelit karena topografinya yang kompleks, sementara faktor-faktor lainnya mendukung pengamatan metana. Akibatnya, sensor satelit dengan resolusi spasial tinggi dapat memantau lokasi minyak dan gas ini secara efektif, sedangkan sensor beresolusi kasar akan kesulitan memantau emisi metana.

Di beberapa bagian Irak, produksi sulit dipantau antara bulan Juni dan Agustus karena angin Shamal, angin kencang musiman dari barat laut.

Wilayah penghasil minyak dan gas lainnya yang sulit dipantau

Sebagian besar produksi minyak dan gas di beberapa negara Amerika Latin berada di wilayah yang sulit dipantau. Sebagai contoh, 70% produksi Kolombia mungkin sulit dipantau dengan satelit. Produksi ini terjadi di Cekungan Putumayo-Orient-Maranon di sepanjang perbatasan dengan Ekuador, yang tutupan awannya yang persisten menghambat upaya pemantauan, serta di Cekungan Lembah Magdalena Atas, Tengah, dan Bawah, yang terletak di pegunungan Andes, sehingga pemantauan menjadi rumit. Hampir seluruh produksi minyak dan gas (98%) di Ekuador berada di wilayah yang sulit dipantau. Lokasi produksi di Ekuador berkelompok di Cekungan Orient, bagian dari wilayah Amazon, yang terletak tepat di garis khatulistiwa. Seperti di Kolombia, karena iklim hutan hujan tropis, pengamatan satelit dapat terhambat oleh tutupan awan yang persisten sepanjang tahun.

Studi Kasus

Faktor-faktor yang membuat pemantauan metana menjadi tantangan bervariasi tergantung pada lokasi fasilitas. Studi kasus ini dipilih untuk menunjukkan bagaimana kombinasi faktor lingkungan yang berbeda memengaruhi kemampuan satelit dalam memantau emisi metana dari fasilitas di seluruh dunia.

Tambang Batu Bara Proyek Tabang, Indonesia

Tambang Batu Bara Proyek Tabang, yang terletak di Kalimantan Timur, adalah kumpulan tambang batu bara yang mencakup area seluas 30 km². Batu bara sub-bituminus ditambang di lokasi ini. Tambang ini adalah tambang penghasil metana terbesar ke-7 di Indonesia menurut [Global Energy Monitor](#). Pemantauan metana di lokasi ini menjadi tantangan sepanjang tahun (11 bulan kategori sedang dan 1 bulan kategori sulit) karena berbagai faktor.

Lokasinya tertutup awan selama 9 bulan dalam setahun, dan tambang berada di wilayah pegunungan yang akan membatasi pengamatan, terutama dari satelit dengan resolusi spasial kasar yang lebih dipengaruhi oleh keterjalan medan. Dalam kasus terbatas ketika satelit dapat menemukan kondisi bebas awan untuk mengamati permukaan, permukaannya pada gelombang inframerah pendek yang digunakan satelit tampak gelap, sehingga kemungkinan hanya semburan metana kuat yang akan terdeteksi.

Kondisi pengamatan yang sulit di Tambang Batu Bara Tabang, Indonesia

Medan kasar, permukaan gelap, dan tutupan awan persisten di tambang batu bara Tabang, Indonesia membuat pengamatan metana oleh satelit menjadi sulit sepanjang tahun.



Faktor lingkungan

Jumlah bulan ketika pemantauan metana sulit dan sedang



Tutupan awan

9/12



Kecepatan angin

0/12



Kekasaran medan

12/12



Elevasi matahari

0/12



Kecerahan permukaan

7/12



Dampak gabungan

12/12



Tambang Batu Bara Shanxi Qincheng, Tiongkok

Tambang batu bara bawah tanah Shanxi Qincheng, yang terletak di wilayah penghasil batu bara utama Tiongkok di Provinsi Shanxi, menambang batu bara antrasit terutama untuk pembangkit listrik. Dengan kedalaman 446 m, tambang ini bersifat intensif metana karena strukturnya yang dalam. Pemantauan metana menjadi tantangan sepanjang tahun (12 bulan dengan kategori sedang) terutama medan Pegunungan Taihang yang terjal, yang dapat membatasi kegunaan satelit pemetaan area. Ada juga awan yang muncul secara berkala, dan permukaan tampak gelap selama Agustus dan September.

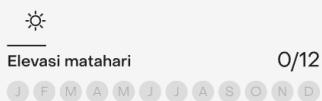
Kondisi pengamatan yang sulit di Tambang Batu Bara Shanxi Qincheng, Tiongkok

Medan kasar, bersama dengan periode permukaan gelap dan tutupan awan, dapat membuat pengamatan metana oleh satelit menjadi sulit sepanjang tahun di tambang batu bara Shanxi Qincheng, Tiongkok.



Faktor lingkungan

Jumlah bulan ketika pemantauan metana sulit dan sedang



Sumber: Peta dasar: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, dan Komunitas Pengguna GIS

EMBER

Ladang Gas Campo Indio Oeste, Argentina

Campo Indio Oeste adalah lokasi ekstraksi gas yang terletak di Santa Cruz, Argentina, dan kondisi pengamatannya khas untuk bagian selatan Amerika Selatan. Pemantauan metana menjadi tantangan selama setengah tahun (6 bulan kategori sedang). Lokasi ini berangin, dengan kecepatan rata-rata angin bulanan melebihi 4 meter per detik antara Oktober dan Januari, yang akan menyebarkan semburan metana sehingga sulit dideteksi. Pemantauan metana juga terhambat selama musim dingin (Juni-Juli) ketika posisi matahari rendah.

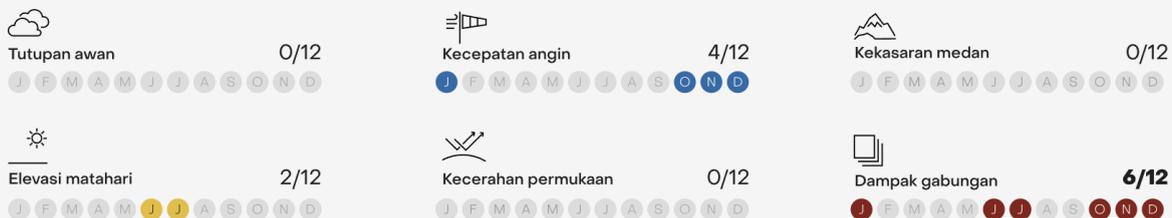
Kondisi pengamatan yang sulit di Lapangan Gas Campo Indio Oeste, Argentina

Elevasi matahari rendah di musim dingin dan kecepatan angin tinggi di musim panas membuat pengamatan metana oleh satelit menjadi sulit selama setengah tahun.



Faktor lingkungan

Jumlah bulan ketika pemantauan metana sulit dan sedang



Sumber: Peta dasar: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, dan Komunitas Pengguna GIS

EMBER

Pasir Minyak Athabasca, Kanada

Pasir Minyak Athabasca di Alberta, Kanada adalah deposit bitumen yang besar dan salah satu sumber minyak nonkonvensional terbesar di dunia. Wilayah ini mungkin sulit untuk pemantauan metana selama setengah tahun (2 bulan kategori sulit dan 4 bulan kategori sedang). Di musim dingin (November-Februari), matahari berposisi rendah sehingga sangat sedikit cahaya yang mencapai permukaan dan sensor satelit. Permukaan menjadi gelap selama musim dingin (November-Januari) karena salju yang menyerap radiasi gelombang pendek. Penyerapan ini berarti hanya sedikit cahaya yang dipantulkan kembali ke sensor. Bulan Juni juga merupakan bulan berawan yang dapat memengaruhi pemantauan metana oleh satelit.

Kondisi pengamatan yang sulit di Tambang Pasir Minyak Athabasca, Kanada

Elevasi matahari rendah dan kecerahan permukaan rendah di musim dingin membuat pengamatan metana oleh satelit sulit selama setengah tahun.



Faktor lingkungan

Jumlah bulan ketika pemantauan metana sulit dan sedang



Tutupan awan

1/12



Kecepatan angin

0/12



Kekasaran medan

0/12



Elevasi matahari

4/12



Kecerahan permukaan

4/12



Dampak gabungan

6/12



Sumber: Peta dasar: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, dan Komunitas Pengguna GIS

EMBER

4. Langkah ke depan



Merancang strategi pengamatan yang memperhitungkan kondisi lokal

Diperlukan pertimbangan berbagai teknologi saat mengembangkan strategi pemantauan emisi metana. Pengukuran dekat permukaan, dengan sensor pada pesawat, drone, kendaraan darat, atau lokasi statis, mungkin diperlukan untuk mengidentifikasi sumber emisi dan mendorong tindakan mitigasi.

Sistem pengamatan yang andal dibutuhkan untuk mencapai target mitigasi metana. Instrumen berbasis satelit akan menjadi tulang punggung sistem pengamatan metana global berkat kemampuannya mendeteksi peristiwa emisi besar individu dan mengevaluasi emisi regional di wilayah luas dunia.

Satelit baru seperti MethaneSAT dan Tanager-1 memperluas kumpulan instrumen pemantauan yang ada dan menawarkan resolusi spasial tinggi, sehingga memberikan lebih banyak peluang untuk mengukur emisi metana, termasuk di wilayah berawan. Selain itu, penjadwalan pengamatan satelit pada waktu-waktu tertentu dalam setahun ketika kondisi lingkungan mendukung akan meningkatkan cakupan data, sejauh hal itu memungkinkan. Namun, beberapa wilayah akan lebih sulit dipantau dibanding yang lain karena kondisi lingkungan, dan

bergantung pada satelit saja mungkin tidak memadai untuk tujuan tertentu di beberapa wilayah.

Untuk memantau emisi metana secara efektif, diperlukan sistem pengamatan bertingkat. Sistem ini menggunakan berbagai jenis pengukuran untuk memahami emisi sesuai kondisi lingkungan spesifik dan kebutuhan pengguna. Sistem ini mirip dengan sistem pengamatan cuaca, yang mengombinasikan pengamatan satelit dengan radar, pengukuran oleh stasiun darat, dan balon cuaca untuk menghasilkan data yang dibutuhkan dalam model prakiraan cuaca serta pemantauan tren iklim jangka panjang. Sebagai contoh, pemantauan berkelanjutan oleh stasiun darat dapat mengukur suhu udara di wilayah Arktik yang pengamatan satelitnya terbatas. Sebaliknya, satelit dapat mengukur suhu udara di lautan, yang tidak memiliki stasiun darat.

Desain universal untuk sistem pengamatan bertingkat kemungkinan tidak cocok untuk semua skenario karena keberagaman lingkungan, variasi sumber metana, dan keterbatasan teknologi. Pengguna lokal perlu menyesuaikan teknologi pengukuran dengan kondisi, kebutuhan, dan sumber daya spesifiknya. Di wilayah dengan kondisi pengamatan yang jarang mendukung, seperti di Ekuador atau Indonesia, satelit akan kurang efektif dalam memantau peristiwa emisi besar atau membantu validasi inventarisasi emisi metana. Dalam kasus ini, sistem yang andal perlu dikembangkan untuk menangani tugas tersebut. Membuat sistem semacam ini dapat diterapkan dengan sumber daya yang tersedia, termasuk di negara berkembang, adalah tugas penting bagi peneliti, pembuat kebijakan, dan donor.

Teknologi alternatif untuk pengukuran metana

Sejumlah teknologi alternatif digunakan untuk melengkapi pemantauan metana berbasis satelit. Teknologi ini berbasis sensor yang dipasang pada pesawat, drone, kendaraan darat, atau lokasi tetap. Digunakan secara individu atau kombinasi, sistem ini menawarkan pandangan mendetail mengenai emisi metana, sehingga mengisi kekosongan skala spasial dan/atau temporal yang tidak dapat dicakup oleh sistem satelit. Karena berada dekat dengan sumber

emisi, teknologi ini dapat sering mendeteksi emisi yang jauh lebih kecil dan membantu menemukan sumber spesifiknya, sehingga mendukung mitigasi. Saat ini, penelitian dan investasi bergerak cepat untuk mengubah teknologi individual ini menjadi sistem pemantauan yang kuat dan membuatnya lebih mudah diakses.

Tidak ada satu teknologi pun yang dapat menjadi solusi tunggal untuk mengukur metana secara efektif di semua skala spasial dan temporal yang diperlukan untuk mendukung mitigasi. Setiap teknologi hanya memberikan pandangan parsial tentang metana yang tak terlihat, sehingga kombinasi dari berbagai teknologi yang terintegrasi dalam sistem pengamatan bertingkat akan diperlukan. Selain itu, semua sensor dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti angin, tutupan awan, dan ketersediaan cahaya. Misalnya, beberapa sensor berbasis darat pasif yang bergantung pada cahaya sekitar juga terpengaruh oleh kondisi cahaya rendah, seperti halnya sensor satelit. Sebaliknya, sensor aktif yang menghasilkan sumber cahayanya sendiri tidak terpengaruh oleh kondisi cahaya alami (begitu juga dengan beberapa sistem yang tidak menggunakan penyerapan cahaya untuk mendeteksi metana). Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi bagaimana berbagai pendekatan pengukuran alternatif merespons tantangan lingkungan. Untuk mengembangkan strategi pemantauan metana yang efektif, pemahaman terhadap keterbatasan baik teknologi satelit maupun alternatif sangatlah penting.

Seperti yang ditunjukkan dalam laporan ini, kombinasi teknologi yang tepat untuk membentuk sistem ini perlu disesuaikan secara geografis dengan memperhitungkan karakteristik emisi dan kondisi lingkungan lokal. Di beberapa wilayah, data satelit saja mungkin sudah cukup untuk pemantauan rutin peristiwa emisi besar dan estimasi emisi top-down. Namun, di wilayah lain, teknologi tambahan—yang mungkin dikombinasikan dengan pengamatan satelit—akan diperlukan.

Melampaui teknologi spesifik

Membangun sistem pengamatan bertingkat yang efektif memerlukan lebih dari sekadar penggunaan sensor. Untuk mencapainya, diperlukan upaya dan dukungan yang terkoordinasi. Dengan dukungan eksternal jika diperlukan, pemangku kepentingan lokal perlu membangun kapasitas untuk mengembangkan, mengevaluasi, dan menyesuaikan teknologi pengukuran sesuai kondisi spesifik mereka, dan mereka membutuhkan sumber daya untuk melakukannya.

Praktisi di berbagai wilayah yang menghadapi tantangan serupa perlu dihubungkan untuk bertukar praktik terbaik dan pelajaran yang dipetik, sehingga inovasi yang dipimpin pengguna dapat menyebar. Selain itu, upaya internasional untuk mengembangkan protokol pengujian dan fasilitas perlu dipercepat untuk mendorong konsistensi dan kepercayaan terhadap data yang dihasilkan.

Untuk mencapai target iklim, dunia perlu [mengurangi emisi metana terkait bahan bakar fosil sebesar 75% pada tahun 2030](#). Satelit akan memainkan peran kunci dalam upaya ini, memantau kemajuan langkah-langkah mitigasi yang telah dipahami dengan baik dan juga menyoroti peluang tindakan baru. Dengan waktu yang terbatas, pengetahuan harus dibagikan secara bebas dan efisien sehingga semua pemangku kepentingan dapat memaksimalkan dampak mereka dalam perjuangan kolektif ini.

Metodologi

Berikut ini adalah penjelasan teknis mengenai metode dan input yang digunakan untuk menentukan kategori deteksi.

Lima dataset berbasis grid dikombinasikan untuk menciptakan skor dengan tiga kategori: menguntungkan, sedang, dan sulit untuk deteksi metana. Sistem penilaian ini dirancang fleksibel agar dapat dijalankan pada resolusi spasial atau interval waktu apa pun. Untuk keperluan studi ini, setiap dataset diinterpolasi ke grid spasial dan temporal yang konsisten ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$, yang kira-kira setara dengan resolusi 10 km di ekuator, dan interval waktu bulanan). Grid spasial dipilih agar sama dengan grid ERA5-land.

Untuk setiap dataset input, kondisi di setiap sel grid diklasifikasikan sebagai menguntungkan, sedang, atau sulit berdasarkan ambang batas yang ditentukan pada tabel di bawah ini.

Kategori gabungan untuk setiap sel grid/bulan ditentukan sebagai berikut:

- Menguntungkan: Semua input harus memiliki kategori menguntungkan.
- Sedang: Satu atau lebih input memiliki kategori sedang.
- Sulit: Satu atau lebih input memiliki kategori sulit.

Hasil akhirnya adalah kategori deteksi untuk setiap bulan, untuk setiap piksel global sebesar 0,1 derajat.

Dataset input dan ambang batas yang digunakan untuk menghitung kategori kesulitan

Data input	Data sumber	Menguntungkan	Sedang	Sulit
Variabilitas elevasi	GMTED2010	$\sigma_z < 80 \text{ m}$	$80 \leq \sigma_z \leq 100$	$\sigma_z > 100 \text{ m}$
Sudut zenith matahari	Modelled	$\theta < 70^\circ$	$70^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$	$\theta > 75^\circ$
Tutupan awan	Cloud Score+	$c > 0.3$	$0.2 \leq c \leq 0.3$	$c < 0.2$
Albedo	Sentinel-2	$\alpha > 0.06$	$0.02 \leq \alpha \leq 0.06$	$\alpha < 0.02$
Kecepatan angin	ERA5 land	$w < 4 \text{ ms}^{-1}$	$4 \leq w \leq 10$	$w > 10 \text{ ms}^{-1}$

EMBER

Variabilitas elevasi

Wilayah pegunungan diidentifikasi menggunakan variabilitas elevasi dari model elevasi digital [GMTED2010](#). Deviasi standar elevasi dalam kotak grid 0,1 derajat dihitung dari data resolusi 30 arcsecond. Deviasi standar >100 m diklasifikasikan sebagai sulit, 80 m dan 100 m sebagai sedang, dan kurang dari 80 m sebagai menguntungkan. Ambang ini sama dengan yang digunakan untuk menerapkan kualitas pada [algoritma TROPOMI](#).

Sudut zenit matahari

Sudut zenit matahari dimodelkan menggunakan hari dalam tahun dan lintang. Nilai bulanan dihitung sebagai rata-rata dari nilai maksimum harian. Sudut zenit >75° diklasifikasikan sebagai sulit, antara 70° dan 75° sebagai sedang, dan kurang dari 70° sebagai menguntungkan. Ambang ini diambil dari [algoritma TROPOMI](#).

Tutupan awan

Area yang terlalu berawan untuk pengambilan data metana diidentifikasi menggunakan produk [Cloud Score+](#) yang tersedia di Google Earth Engine. Produk ini dikembangkan menggunakan citra Sentinel-2 dan pembelajaran mesin untuk membedakan gambar berawan dan cerah. Nilai 0 menunjukkan langit “berawan” dan 1 menunjukkan langit “cerah”. Data rata-rata Cloud Score+ bulanan untuk tahun 2020-2023 digunakan, dan nilai rata-ratanya dihitung untuk memperhitungkan variasi antartahun.

Pengembang Cloud Score+ merekomendasikan ambang batas 0,65 untuk membedakan hari cerah dan berawan pada data mentah harian 10 m. Namun, ambang baru dibutuhkan ketika data diagregasi ke resolusi 0,1 derajat dan interval bulanan. Bagian penyetelan parameter di bawah ini menjelaskan bagaimana ambang batas yang sesuai dipilih secara empiris. Ambang tutupan awan yang disesuaikan untuk kondisi ‘menguntungkan’ diperkirakan lebih dari 0,3, sedangkan ambang untuk kondisi ‘sulit’ didefinisikan sebagai $\leq 0,2$. Penentuan ambang ini dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi produksi minyak, gas, dan batu bara di masing-masing negara agar masuk ke dalam kategori ‘sedang’ dan ‘sulit’.

Albedo

Albedo permukaan dalam inframerah gelombang pendek, yang digunakan untuk pengukuran metana, diperkirakan dari band 12 [Sentinel-2](#) (2.190 nm). Data ini difilter untuk menghilangkan perairan darat dan laut menggunakan [peta klasifikasi lahan MODIS](#) serta difilter awan menggunakan produk Cloud Score+. Rata-rata albedo bulanan dihitung dengan Google Earth Engine dan diagregasi dari resolusi 10 m ke $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Data bulanan dikeluarkan untuk tahun 2020-2023. Rata-rata bulanan dihitung untuk memperhitungkan variabilitas antartahun pada albedo dan mengurangi dampak tutupan awan terhadap cakupan data. Bagian penyetelan parameter di bawah ini menjelaskan bagaimana ambang batas untuk pendeteksian yang menguntungkan dipilih. Ambang albedo yang disesuaikan secara empiris untuk kondisi ‘menguntungkan’ diperkirakan lebih dari

0,06, sedangkan ambang untuk kondisi 'sulit' didefinisikan sebagai albedo $\leq 0,02$. Nilai ini dipilih karena terkait dengan data berkualitas rendah dalam algoritma pemrosesan TROPOMI.

Kecepatan angin

Kami menggunakan kecepatan angin zonal (u) dan meridional (v) rata-rata bulanan pada ketinggian 10 meter untuk tahun 2020–2023 dari dataset ERA5-Land, yang tersedia di [Copernicus Climate Data Store](#). Kecepatan angin dihitung dari komponen-komponennya, dan klimatologi bulanan turut dihitung. Kecepatan angin di bawah 4 m/s dikategorikan sebagai 'menguntungkan', antara 4–10 m/s dikategorikan sebagai 'sedang', dan di atas 10 m/s dikategorikan sebagai 'sulit'. Bagian penyetelan parameter di bawah ini menjelaskan bagaimana ambang batas 'menguntungkan' dipilih. Untuk kecepatan angin, kategori 'sulit' didefinisikan sebagai kecepatan yang melebihi ambang 10 m/s. Ambang ini ditetapkan berdasarkan [publikasi](#) yang menunjukkan bahwa probabilitas deteksi menurun pada kecepatan angin yang lebih tinggi. [Studi-studi tersebut](#) menunjukkan penurunan probabilitas deteksi hingga 8 m/s, sehingga 10 m/s dipilih sebagai batas yang lebih konservatif. Pendekatan ini bersifat semi-kuantitatif, karena ambang batas dapat bervariasi tergantung pada tingkat emisi, dan tidak ada definisi yang jelas untuk kategori 'sedang' dan 'sulit'.

Penyetelan ambang batas

Untuk menentukan ambang batas 'menguntungkan' bagi tutupan awan, kecepatan angin, dan albedo, kami menyetel parameter ini menggunakan 2.962 pengamatan semburan metana dari TROPOMI, yang dideteksi oleh platform Kayrros dan IMEO. Kami mengeksplorasi berbagai nilai ambang yang masuk akal—kecepatan angin (1–14 m/s), tutupan awan (0,25–0,6), dan albedo (0,025–0,3)—dan menghasilkan 500 kombinasi berbeda menggunakan metode Latin hypercube sampling. Untuk setiap kombinasi, kami mengevaluasi seberapa sering pengamatan TROPOMI terjadi di lokasi dan bulan dengan kondisi yang menguntungkan. Kami mendefinisikan kombinasi terbaik sebagai yang menemukan pengamatan dalam kondisi menguntungkan sekitar 85% dari kasus.

Perlu dicatat bahwa hanya kategori 'menguntungkan' yang disetel, karena keberadaan suatu pengamatan dapat ditentukan dengan jelas. Ambang batas yang memisahkan kategori 'sedang' dan 'sulit' tidak disetel dengan cara ini karena belum ada metode yang jelas untuk melakukannya secara presisi. Sebagai gantinya, ambang batas tersebut ditentukan berdasarkan pertimbangan kami untuk setiap parameter, sebagaimana dijelaskan di atas.

Keterbatasan metode dan pekerjaan masa depan

Tidak ada ambang batas universal yang berlaku untuk semua satelit. Selain itu, sebagian sensor mungkin lebih baik dalam mendeteksi metana dibandingkan sensor lainnya dalam kondisi lingkungan tertentu. Misalnya, sensor dengan resolusi spasial tinggi (seperti GHGSat, EMIT, CarbonMapper) dapat mendeteksi metana di beberapa wilayah pegunungan yang menjadi tantangan bagi pemetaan fluks area (seperti TROPOMI). Selain itu, untuk sebagian besar parameter, tidak ada batasan fisik yang jelas ketika sensor berhenti mendeteksi metana. Namun, ada degradasi bertahap pada kinerja yang diharapkan. Penyetelan ambang batas hanya dilakukan pada dataset terbatas, berdasarkan satu sensor, dan hanya mencakup deteksi positif. Oleh karena itu, semua ambang batas yang disediakan harus diperlakukan sebagai panduan kasar, bukan batas fisik yang kaku untuk kinerja satelit.

Keterbatasan lainnya adalah kategori deteksi didasarkan pada data bulanan, sementara pengamatan satelit merepresentasikan satu lintasan instan. Penyederhanaan ini disebabkan oleh tantangan dalam mengelola dataset besar. Namun, penggunaan data bulanan dapat mengaburkan variabilitas yang ada dalam pengamatan harian.

Tidak semua faktor yang memengaruhi pengambilan metana diperhitungkan dalam studi ini. Misalnya, beban aerosol tinggi dapat sangat penting di wilayah kering dan semikering tetapi belum diperhitungkan. Variabilitas albedo permukaan juga akan memengaruhi pengambilan metana, terutama untuk sensor multispektral, yang menyulitkan pemisahan gumpalan gas metana dari artefak permukaan. Hal tersebut juga belum dipertimbangkan dalam studi ini.

Lokasi aset bahan bakar fosil

Lokasi situs ekstraksi bahan bakar fosil diperoleh dari [Global Coal Mine Tracker \(GCMT\)](#) dan [Global Oil and Gas Extraction Tracker \(GOGET\)](#) milik Global Energy Monitor (GEM). Kategori 'sulit', 'sedang', dan 'menguntungkan' dihitung untuk titik lintang dan bujur terdekat dari 3.778 tambang batu bara yang beroperasi dan 4.703 aset hulu minyak dan gas yang beroperasi. Hanya situs eksplorasi minyak dan gas darat yang disertakan.

Data produksi bahan bakar fosil

Data produksi batu bara berasal dari suplemen terbaru yang dirilis pada [September 2024](#) untuk Coal Mine Tracker milik Global Energy Monitor. Suplemen ini menyediakan data produksi historis untuk tambang batu bara yang beroperasi di seluruh dunia dengan kapasitas lebih dari 1 juta ton per tahun, mencakup tahun 2017 hingga 2023. Untuk analisis ini, digunakan nilai produksi dari tahun terbaru yang tersedia untuk setiap tambang batu bara.

Data produksi minyak dan gas berasal dari [Global Oil and Gas Extraction Tracker \(GOGET\)](#).

Data ini mencakup situs ekstraksi yang memiliki produksi 1 juta barel minyak per tahun atau lebih dan/atau cadangan minyak sebesar 25 juta barel. Untuk memperkirakan produksi gabungan minyak dan gas, output gas dikonversi menjadi barel minyak ekuivalen per tahun. Sama dengan batu bara, digunakan data produksi dari tahun terbaru untuk analisisnya.

Produksi dalam kategori 'sulit', 'sedang', dan 'menguntungkan' dihitung dengan mengalikan produksi GEM dengan proporsi tahun yang diklasifikasikan dalam setiap kategori. Penting untuk dicatat bahwa dataset GEM tidak mencakup informasi produksi untuk semua aset yang terdaftar, sehingga menyebabkan beberapa data hilang. Namun, kami memilih dataset ini karena dapat diakses secara terbuka.



Ucapan terima kasih

Kontributor

Para penulis berterima kasih kepada Reynaldo Dizon atas pembuatan ilustrasi laporan ini.

Para penulis juga berterima kasih kepada beberapa rekan yang telah memberikan masukan yang berharga selama konseptualisasi dan persiapan laporan ini, termasuk Dody Setiawan, Zitely Tzompa Sosa, David McCabe, Sabina Assan, Hannah Broadbent, Eleanor Whittle, Muyi Yang, Jonathan Banks, dan Steve Reyes.

Kami berterima kasih kepada semua peninjau eksternal atas masukan mereka yang telah membantu menyempurnakan laporan ini.

Foto

Kredit foto sampul: [Unsplash](#)

© Ember, 2025

Diterbitkan di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa (CC BY-SA 4.0). Anda didorong untuk membagikan dan mengadaptasi laporan ini, tetapi Anda harus memberikan kredit kepada penulis dan judul, serta membagikan materi yang Anda buat di bawah lisensi yang sama.