

SKRIPSI

ESTIMASI KUALITAS UDARA PM₁₀ DAN CO BERBASIS CITRA SATELIT PENGINDERAAN JAUH DI SEKITAR PT. SEMEN TONASA

Disusun dan diajukan oleh:

**ST. RAHMA NURANNISA
D131 20 1043**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ESTIMASI KUALITAS UDARA (PM₁₀ DAN CO) BERBASIS CITRA SATELIT PENGINDERAAN JAUH DI SEKITAR PT. SEMEN TONASA

Disusun dan diajukan oleh

St. Rahma Nurannisa
D131201043

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 15 Agustus 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing,



Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Ir. Nurul Masyiah Rani Harusi, S.T., M.Eng.
NIP 199501152021074001

Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., AER.
NIP 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : St. Rahma Nurannisa

NIM : D131201043

Program Studi : Teknik Lingkungan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Estimasi Kualitas Udara PM_{10} dan CO Berbasis Citra Satelit Penginderaan Jauh
di Sekitar PT. Semen Tonasa}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 12 Juli 2024

Yang Menyatakan



St. Rahma Nurannisa

ABSTRAK

ST. RAHMA NURANNISA. *Estimasi Kualitas Udara PM_{10} dan CO Berbasis Citra Satelit Penginderaan Jauh di Sekitar PT. Semen Tonasa* (dibimbing oleh Ir. Nurul Masyiah Rani Harusi, S.T., M.Eng.)

Aktivitas dari sektor industri merupakan salah satu sektor yang melepaskan polutan ke udara. Terkhusus pada industri semen, partikel pencemar seperti PM_{10} dan CO berpotensi membahayakan kesehatan manusia. PT. Semen Tonasa, produsen semen terbesar di Kawasan Timur Indonesia, berkontribusi terhadap emisi debu dan polutan. Dengan meningkatnya kebutuhan semen, emisi dari industri semen terus bertambah, memengaruhi kualitas udara ambien.

Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi kualitas udara ISPU menggunakan Citra Satelit Sentinel 2 dengan algoritma untuk mengetahui sebaran polutan PM_{10} dan CO di sekitar kawasan industri selama Triwulan III (Agustus) dan Triwulan IV (Oktober). Tahapan dimulai dengan analisis latar belakang dan perumusan masalah, diikuti pengumpulan data sekunder dari referensi dan titik sampling. Data raster Citra Satelit yang terdiri dari pixel, dianalisis untuk menentukan konsentrasi polutan. Resolusi pixel berperan penting dalam representasi objek geografis. Hasil analisis konsentrasi udara ambien dan citra satelit Sentinel 2 dikonversi menjadi Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) untuk membandingkan hasil dari kedua Citra. Proses penelitian meliputi persiapan, pengambilan data, dan analisis data. Berdasarkan hasil pengolahan data Citra Satelit, konsentrasi tertinggi PM_{10} mencapai $69,88 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan CO $83,6 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. ISPU tertinggi untuk PM_{10} adalah 67,52 (Sedang), dengan ISPU CO stabil di 1,04 (Baik). Uji Korelasi Pearson menunjukkan korelasi signifikan antara data Citra Satelit Sentinel 2 dengan pengukuran langsung dengan nilai ($p < 0,05$).

Kata Kunci: Sentinel 2, ISPU, PT. Semen Tonasa

ABSTRACT

NAMA LENGKAP MAHASISWA. *Air Quality Estimation PM_{10} and CO Based on Remote Sensing Satellite Images Around PT. Tonasa Cement* (supervised by Ir. Nurul Masyiah Rani Harusi, S.T., M.Eng)

Activities from the industrial sector are one of the sectors that release pollutants into the air. Especially in the cement industry, polluting particles such as PM_{10} and CO have the potential to endanger human health. PT. Tonasa Cement, the largest cement producer in Eastern Indonesia, contributes to dust and pollutant emissions. With the increasing demand for cement, emissions from the cement industry continue to grow, affecting ambient air quality.

This study aims to estimate the air quality of ISPU using Sentinel 2 Satellite Imagery with an algorithm to determine the distribution of PM_{10} and CO pollutants around industrial estates during the Third Quarter (August) and Fourth Quarter (October). The stages begin with background analysis and problem formulation, followed by secondary data collection from references and sampling points. Raster data from Satellite Imagery, which consists of pixels, is analyzed to determine the concentration of pollutants. Pixel resolution plays an important role in the representation of geographical objects. The results of the ambient air concentration analysis and Sentinel 2 satellite imagery were converted into an Air Pollution Standard Index (ISPU) to compare the results of the two Images. The research process includes preparation, data collection, and data analysis.

Based on the results of satellite image data processing, the highest concentration of PM_{10} reached $69.88 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ and CO $83.6 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. The highest ISPU for PM_{10} was 67.52 (Moderate), with ISPU CO stable at 1.04 (Good). The Pearson Correlation Test showed a significant correlation between the Sentinel 2 Satellite Imagery data and direct measurements with a value of ($p < 0.05$).

Keywords: Sentinel 2, ISPU, PT. Semen Tonasa

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
KATA PENGANTAR	1
BAB I PENDAHULUAN	4
1.1 Latar Belakang	4
1.2 Rumusan Masalah	6
1.2 Tujuan Penelitian/Perancangan	7
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan	7
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Pencemaran Udara	9
2.2 Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)	10
2.3 Udara Ambien	12
2.4 Partikulat Matter PM ₁₀	15
2.5 Karbon Monoksida (CO)	15
2.6 Penginderaan Jauh.....	17
2.7 Sistem Informasi Geografis	21
2.8 Satelit Sentinel 2	21
2.9 Uji Normalitas Shapiro Wilk	27
2.10 Uji Korelasi Pearson	33
BAB III METODE PENELITIAN/PERANCANGAN	35
3.1 Rancangan Penelitian	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	52
3.1 Estimasi Konsentrasi PM ₁₀ dan CO	52
3.3.1 Uji Normalitas	84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	90
5.1 Kesimpulan	90
5.2 Saran.....	91
DAFTAR PUSTAKA	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Skema Penetapan Lokasi Pemantauan Kualitas Udara Ambien.....	14
Gambar 2. Komponen Penginderaan Jauh	18
Gambar 3. Sistem Pasif Penginderaan Jauh	19
Gambar 4. Sistem Aktif Penginderaan Jauh	19
Gambar 5. Spektrum Elektromagnetik dalam Penginderaan Jauh	20
Gambar 6. Tampilan Skema Pesawat Luar Angkasa Sentinel-2.....	23
Gambar 7. Ilustrasi cakupan dan waktu kunjungan kembali yang diperkirakan untuk akuisisi Sentinel-2 MSI.	24
Gambar 8. Frekuensi kunjungan ulang geometrik akibat tumpang tindih antara orbit yang berdekatan.....	25
Gambar 9. Pita resolusi spasial Sentinel-2 10 m	25
Gambar 10. Pita resolusi spasial Sentinel-2 20 m	26
Gambar 11. Pita resolusi spasial Sentinel-2 60 m	26
Gambar 12. Representasi Grafis Produk Inti Sentinel-2	27
Gambar 13. Alur Penelitian.....	36
Gambar 14. PT. Semen Tonasa	38
Gambar 15. Titik Pengukuran	38
Gambar 16. Tampilan Aplikasi <i>Google Earth</i>	40
Gambar 17. Tampilan Copernicus Data Space.....	41
Gambar 18. Tampilan Aplikasi ArcGIS 10.8.....	41
Gambar 19. Tampilan Aplikasi QGIS 3.36.1	42
Gambar 20. Tampilan Perangkat Lunak SPSS	42
Gambar 21. Metode Pengambilan Data Citra Satelit Sentinel 2	46
Gambar 22. Metode Pengolahan Data PM ₁₀ dan CO Citra Satelit Sentinel 2....	48
Gambar 23. Alur Pembuatan Visualisasi Data Raster dan Layouting Peta.....	49
Gambar 24. Metode Uji RMSE	50
Gambar 25. Metode Uji Korelasi Pearson.....	51
Gambar 26. Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan III (Agustus)	58
Gambar 27. Konsentrasi CO Triwulan III (Agustus)	60
Gambar 28. Peta Visualisasi Konsentrasi (a) PM ₁₀ (b) CO.....	60
Gambar 29. Grafik Rekapitulasi Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan III (Agustus).....	65
Gambar 30. Grafik Rekapitulasi Konsentrasi CO Triwulan III (Agustus).....	66
Gambar 31. Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan IV (Oktober)	67
Gambar 32. Konsentrasi CO Triwulan IV (Oktober)	69
Gambar 33. Peta Visualisasi Konsentrasi (a) PM ₁₀ (b) CO.....	69
Gambar 34. Grafik Rekapitulasi Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan IV (Oktober).....	74
Gambar 35. Grafik Rekapitulasi Konsentrasi CO Triwulan IV (Oktober).....	76

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Konversi nilai konsentrasi parameter ISPU.	11
Tabel 2. Kategori Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU).	12
Tabel 3. Persentase Sumber Pencemar CO	16
Tabel 4. Lokasi Pengukuran Udara Ambien	38
Tabel 5. Data Hasil Citra Sentinel 2.....	53
Tabel 6. Konsentrasi PM ₁₀ dan CO Triwulan III (Agustus).....	53
Tabel 7. Konsentrasi PM ₁₀ dan CO Triwulan IV (Oktober)	55
Tabel 8. Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan III (Agustus)	56
Tabel 9. Konsentrasi CO Triwulan III (Agustus).....	58
Tabel 10. Rekapitulasi Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan III (Agustus).....	64
Tabel 11. Rekapitulasi Konsentrasi CO Triwulan III (Agustus).....	65
Tabel 12. Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan III (Oktober).....	66
Tabel 13. Konsentrasi CO Triwulan IV (Oktober).....	68
Tabel 14. Rekapitulasi Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan IV (Oktober).....	73
Tabel 15. Rekapitulasi Konsentrasi CO Triwulan IV (Oktober).....	74
Tabel 16. Rekapitulasi Kategori ISPU Triwulan III (Agustus).....	76
Tabel 17. Rekapitulasi Kategori ISPU Triwulan IV (Oktober).....	80
Tabel 18. Uji Normalitas Konsentrasi PM ₁₀	84
Tabel 19. Uji Normalitas Konsentrasi CO	84
Tabel 20. Uji Normalitas Konsentrasi PM ₁₀	85
Tabel 21. Uji Normalitas Konsentrasi CO	85
Tabel 22. Uji Korelasi Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan III (Agustus)	86
Tabel 23. Uji Korelasi Konsentrasi CO Triwulan III (Agustus)	87
Tabel 24. Uji Korelasi Konsentrasi PM ₁₀ Triwulan IV (Oktober).....	88
Tabel 25. Uji Korelasi Konsentrasi CO Triwulan IV (Oktober).....	88

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Indeks Kualitas Udara (ISPU)	95
Lampiran 2. Perhitungan RMSE	96
Lampiran 3. Dokumentasi	97

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim Alhamdulillah Puji dan Syukur kehadiran Allah SWT. serta shalawat salam kepada bagian Muhammad SAW. Atas berkat, rahmat, serta ridho dari Allah SWT. sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Estimasi Kualitas Udara ISPU (PM₁₀ dan CO) Berbasis Citra Satelit Penginderaan Jauh di Sekitar PT. Semen Tonasa” sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata 1 Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat memberikan tambahan pengetahuan dan pemahaman kepada pembaca mengenai estimasi konsentrasi PM₁₀ dan CO dengan memanfaatkan penginderaan jauh.

Pada bagian ini penulis merangkai tidak hanya sebagai Kata Pengantar, melainkan lebih dari itu penulis menjadikan bagian ini untuk mengungkapkan terima kasih serta banyaknya rasa yang tidak dapat penulis sampaikan secara langsung. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini telah mengalami berbagai kendala sampai akhirnya di tahap ini. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih dan harapan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM, ASEAN.Eng selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Ibu Dr. Eng Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Kak Ir. Nurul Masyiah Rani Harusi, S.T., M.Eng. sebagai pembimbing Tugas Akhir yang sangat luar biasa dalam memberikan bimbingan dan arahnya kepada penulis. Terima kasih untuk waktu dan tenaga yang telah diberikan, terima kasih sudah menjadi *role model* penulis, terima kasih untuk semangat, nasihatn serta afirmasi positif yang selalu diberikan. Semoga kelak dipertemukan kembali di kesempatan lainnya, semoga senantiasa dilimpahkan rahmat-Nya atas segala kebaikan yang diberikan kepada penulis.
4. Seluruh Dosen Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Seluruh staf dan karyawan Gedung Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dan yang istimewa penulis persembahkan untuk:

1. Teristimewa dari yang istimewa, untuk perempuan cantik hati dan parasnya, Almh. Hasrinawati yang sosoknya abadi dalam hati penulis. terimakasih untuk cinta kasih, juga semangat yang diberikan kepada penulis hingga menjadi bekal untuk penulis tetap bertahan sampai saat ini walau tanpa sosokmu. terimakasih telah membersamai masa kecil penulis, merawat dan mengasihi, sehingga tumbuh menjadi wanita kuat sepertimu. *I could never be weak cause i learned from the best*, "Ma, insyaa Allah dalam waktu dekat rahma wisuda di kampus dan fakultas yang sama dengan mama", Sampai berjumpa kembali di surga-Nya.

2. Terima kasih kepada Tante, Om, Nenek, Oma, dan seluruh keluarga yang telah memberikan fasilitas terbaik dan dukungannya kepada penulis selama masa studi ini.
3. Terima kasih kepada Ayah Ibu yang senantiasa melangitkan doa-doa baiknya, serta dukungan kepada penulis. Walau terhalang ruang dan waktu, penulis yakin doa-doa baik kalian yang menjadi salah satu sumber energi positif yang penulis miliki.
4. Teruntuk teman-teman Kepengurusan Kabinet Adibrata HMTL FT-UH, Ikram, Yudha, Rani, Ima, Kadri, Agis, Ikka, Ismul, Faruq, Guntur, Jess, Rina, dan Arfi. Orang-orang hebat yang penulis temui sebagai salah satu doa penulis yang diijabah oleh Allah SWT. sebelum memulai masa studi agar senantiasa dipertemukan dengan orang baik. Terima kasih karena telah kebersamai dan mewarnai hari-hari penulis, terima kasih untuk senang, sedih, tawa, tangis, marah, dan panik yang selalu diberikan secara bergantian. Terima kasih sudah menjadi “tempat bermain” ditengah peliknya kehidupan. Jika tidak dengan kalian, mungkin masa kuliah penulis akan berbeda ceritanya.
5. LaKopi member, Mifta, Hajar, Ocang. Terkhusus untuk Mifta partner penelitian *Remot Sensing* yang telah membantu dan berbaik hati berbagi ilmu yang dimiliki kepada penulis serta kebersamai penyelesaian Tugas Akhir dari pagi hingga larut malam selama beberapa bulan terakhir.
6. Teruntuk perempuan cantik dan baik hati, Dinda Wara yang juga telah kebersamai lika-liku kehidupan kampus dari masa pengaderan hingga saat ini, yang selalu mendengarkan keluh kesah penulis. Terima kasih sudah selalu menyediakan BTP sebagai rumah untuk pulang disaat Gowa tidak baik-baik saja.
7. Teruntuk Laboratorium Hidrolika dan seisinya terkhusus teman-teman asisten Yudha, Thoha, Rani, Uri, Bani yang senantiasa kebersamai kegiatan di laboratorium. Terima kasih untuk laboratorium yang sudah menjadi wadah untuk penulis menyalurkan ilmu yang penulis miliki.
8. Teman-teman grup ”BISMILLAH AGUSTUS HARUS WISUDA” dan teman-teman se-KKD Kualitas Udara dan Bising, walaupun di bulan Agustus tidak ada periode wisuda, semoga dibersamakan di periode wisuda September.
9. Teman-teman Entitas 2021 tanpa terkecuali, terkhusus untuk “teman cowok” yang selalu bersedia untuk direpotkan oleh penulis, selalu membantu disaat penulis kesulitan, mengantarkan ke UGD, mengantar dan menjemput, membelikan makan, dan masih banyak lagi kebaikan yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu. Terima kasih karena telah menjadi keluarga di perantauan. *Keep on Fighting Till The End* untuk Entitas 2021, semoga hal-hal baik senantiasa kebersamai.
10. Terima kasih untuk Astri dan Ana yang sudah kebersamai masa pendidikan dari SMA hingga perkuliahan. Terima kasih karena telah menjadi teman yang selalu mendengar seluruh keluh kesah penulis yang tidak dapat dapat penulis ungkapkan selain kepada kalian. Terima kasih telah kebersamai masa-masa tersulit penulis, terima kasih untuk seluruh kebaikan yang diberikan kepada penulis.

11. Teruntuk jodoh penulis kelak, entah dari masa lalu, masa kini, atau orang baru yang akan dipertemukan. Kamu adalah salah satu motivasi penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Penulis sedang berusaha menjadi perempuan hebat yang berpendidikan agar kelak pantas menjadi pasanganmu. Semoga dirimu pun sedang disibukkan untuk hal-hal positif sampai nanti kita dipertemukan di titik terbaik versi diri kita masing-masing.
12. *Last but not least*, terima kasih untuk diri saya sendiri yang sudah melalui *ups and downs* selama masa studi, yang telah berjuang menyelesaikan apa yang telah dimulai. Terima kasih sudah menjadi perempuan hebat ditengah hiruk-pikuk kehidupan yang menerpa. *You did it, girl!*
13. Teruntuk pemilik nim D131201022 yang senantiasa kebersamai penulis, terima kasih untuk segala cerita yang dilukiskan dalam selama perjalanan pendewasaan diri. *Hope u success in ur life.*
14. Dan terima kasih untuk seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan lindungan dan kasih sayang-Nya. Penulis menyadari bahwa karya Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis berharap agar pembaca dapat memberikan masukan yang membangun untuk Tugas Akhir ini.

Gowa, 15 Juli 2024

St. Rahma Nurannisa

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran udara yang terjadi di beberapa kota merupakan salah satu masalah lingkungan yang seringkali diakibatkan oleh keberadaan industri. Partikel pencemar udara seperti, partikel tersuspensi total (TSP) dengan diameter hingga 100 μm , partikel kurang dari 10 μm (PM_{10}), dan partikel kurang dari 2.5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Gas pencemar lainnya termasuk Sulfur dioksida (SO_2), Nitrogen dioksida (NO_2), Karbon monoksida (CO), dan ozon permukaan (O_3). (Rita dkk, 2016). Apabila zat pencemar tersebut melebihi batas ISPU, dapat menimbulkan bahaya bagi kesehatan manusia.

Aktivitas dari sektor industri merupakan salah satu sektor yang melepaskan polutan ke udara. Dewasa ini berbagai kasus pencemaran terhadap lingkungan banyak terjadi. Diantaranya pencemaran udara oleh industri semen yang menghasilkan polutan dalam bentuk emisi debu. Pada industri semen 'X' Kota Cilegon-Banten terdapat kadar debu PM_{10} di ruang pengepakan sebesar 1002,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan di ruang pembuatan kantong semen sebesar 142,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kadar debu PM_{10} tersebut memberikan dampak gangguan saluran pernapasan terhadap para pekerja. Tinggi kadar debu yang mengakibatkan gangguan saluran pernapasan dipengaruhi oleh suhu, kelembaban udara dan kondisi sirkulasi udara yang sebagian kondisi ruangan yang tertutup (Linardita Ferial, 2021). Pada penelitian Anwar (2019) menyatakan konsentrasi CO di PT. Semen Tonasa berada pada rentang 504,04 – 2334,56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

PT. Semen Tonasa adalah produsen semen terbesar di Kawasan Timur Indonesia yang menempati lahan seluas 715 hektar di Desa Biringere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, sekitar 68 kilometer dari kota Makassar. Perseroan yang memiliki kapasitas terpasang 5.980.000 ton semen per tahun ini, mempunyai empat unit pabrik, yaitu Pabrik Tonasa II, III, IV dan V. Keempat unit pabrik tersebut menggunakan proses kering dengan kapasitas masing-masing 590.000 ton semen pertahun untuk Unit II dan III, 2.300.000. Semen merupakan bahan utama yang digunakan untuk membangun perumahan, gedung perkantoran, sarana

transportasi dan lain-lain. Atas dasar itulah maka kuantitas dan kualitas semen harus terus ditingkatkan. Upaya yang perlu ditingkatkan adalah pengontrolan secara kontinu baik dari komposisi semen, maupun sarana produksinya. Kebutuhan terhadap produk semen sangat meningkat dalam berbagai sektor industri. Berdasarkan laporan Asosiasi Semen Indonesia (ASI) yang dikutip Mira Asset Sekuritas, konsumsi semen domestik pada Oktober 2023 mencapai 6,12 juta ton, naik 2,7% dari bulan ke bulan dan 4,4% dari tahun ke tahun. Capaian itu menyusul volume konsumsi nasional sepanjang 9 bulan pertama 2023 yang mencapai 45,3 juta ton. Peningkatan penggunaan semen itu karena gencarnya pembangunan infrastruktur seperti proyek jalan tol maupun program pembangunan satu juta rumah, (Ircham, 2023). Meningkatnya kebutuhan semen tersebut mengakibatkan pabrik-pabrik penghasil semen memicu produksinya.

Pertumbuhan industri pengolahan nonmigas sejak tahun 2021 masih terus berlanjut sampai dengan tahun 2023. Pada triwulan I-2023, pertumbuhan industri pengolahan nonmigas sebesar 4,67 persen, kemudian pada triwulan II-2023 tumbuh sebesar 4,56 persen, dan di triwulan III-2023 naik menjadi 5,02 persen yang melampaui pertumbuhan ekonomi nasional (Kemenperin, 2023). Pertumbuhan sektor industri ini tentu mengakibatkan penambahan emisi pencemar ke udara, khususnya emisi berupa PM_{10} dan CO pada industri semen, sehingga berpotensi mempengaruhi konsentrasi polutan pada udara ambien. Polutan yang diemisikan oleh industri akan mengalami penyebaran di atmosfer yang dipengaruhi oleh dinamika atmosfer seperti kecepatan dan arah angin, turbulensi, suhu udara dan kestabilan atmosfer. Hal ini akan mengakibatkan kontaminasi udara ambien di wilayah sekitar pusat pencemar yang luas penyebarannya tergantung dari kondisi atmosfer saat itu sehingga perlu dilakukan pemantauan kualitas udara yang efektif dan representatif.

Berdasarkan Ditjen Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan, IKU Nasional mengalami peningkatan sejak tahun 2015 - 2023. Tahun 2023 nilai IKU mengalami peningkatan 0,61 poin dan mencapai nilai tertinggi selama 5 tahun terakhir. Sebanyak 26 provinsi nilai IKU nya meningkat jika dibandingkan dengan tahun sebelumnya. Hal ini merupakan dampak dari penerapan kebijakan pengendalian pencemaran udara seperti penetapan baku mutu emisi maupun

kebijakan lain di daerah seperti pembatasan kendaraan, pelaksanaan kegiatan evaluasi kualitas udara perkotaan dan sebagainya. Selain itu, faktor meteorologi seperti arah angin, kecepatan angin dan jumlah hari hujan di suatu daerah, serta waktu pengambilan sampel (musim penghujan atau musim kemarau) dan durasi serta frekuensi pengambilan sampel untuk tambahan data dari daerah.

Pemantauan kualitas udara harus dilakukan secara intensif, salah satu alternatif yang dapat digunakan dalam mengestimasi kualitas udara yaitu menggunakan penginderaan jarak jauh pada sumber emisi dari suatu sumber pencemar industri. Salah satu penelitian untuk memantau kualitas udara ISPU oleh Septiyana, dkk. (2023) memanfaatkan algoritma untuk mendeteksi zat pencemar udara ISPU (PM_{10} , SO_2 , NO_2) dengan membandingkan citra satelit Landsat 8 dan Landsat 9. Sedangkan penelitian lainnya yang dilakukan oleh Dede, dkk. (2020) untuk mendeteksi dan memantau kualitas udara, dilakukan dengan membandingkan data citra Landsat series (Landsat 7 dan Landsat 8) dengan citra satelit MODIS dan Sentinel 2.

Berdasarkan penelitian sebelumnya serta dengan mempertimbangkan manfaat lain dari penginderaan jarak jauh yaitu pemantauan kualitas udara yang efektif dan representatif secara *realtime*, penulis akan melakukan penelitian mengenai estimasi kualitas udara ISPU dengan memanfaatkan Citra Satelit Sentinel 2 yang memiliki resolusi spasial yang lebih beragam, yaitu 10 meter untuk band-bands utama, 20 meter dan 60 meter untuk band-bands dengan panjang gelombang lebih panjang. Ini memungkinkan citra yang lebih tajam dan lebih detail dari permukaan bumi. Penelitian ini menggunakan algoritma dari penelitian Septiyana, dkk. (2023) dan Dede, dkk. (2020) yang dilakukan di area kawasan industri PT. Semen Tonasa untuk mengetahui tren pola sebaran polutan PM_{10} dan CO pada Periode Triwulan III dan IV.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini, yaitu:

1. Berapa estimasi konsentrasi PM_{10} dan CO di PT. Semen Tonasa berdasarkan Citra Satelit Sentinel 2?

2. Bagaimana Kategori ISPU (Indeks Standar Pencemaran Udara) parameter PM_{10} dan CO di PT. Semen Tonasa berdasarkan Citra Satelit Sentinel 2?
3. Bagaimana perbandingan konsentrasi antara pengindraan jauh dengan pengukuran langsung di PT. Semen Tonasa?

1.2 Tujuan Penelitian/Perancangan

1. Mengetahui berapa estimasi konsentrasi PM_{10} dan CO di PT. Semen Tonasa berdasarkan citra satelit Sentinel 2
2. Mengetahui bagaimana Kategori ISPU (Indeks Standar Pencemaran Udara) parameter PM_{10} dan CO di PT. Semen Tonasa berdasarkan citra satelit Sentinel 2
3. Mengetahui bagaimana perbandingan konsentrasi antara pengindraan jauh dengan pengukuran langsung di PT. Semen Tonasa

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

1. Manfaat bagi penulis
 Penelitian ini bermanfaat untuk menambah wawasan serta meningkatkan kompetensi penulis, selain itu penelitian ini merupakan salah satu syarat yang berlaku di Departemen Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin untuk mendapatkan gelar sarjana.
2. Manfaat bagi universitas
 Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi oleh mahasiswa yang akan melakukan penelitian lebih lanjut terkait topik yang sama.
3. Manfaat bagi instansi terkait
 Penelitian ini dapat dijadikan sebagai salah satu pedoman untuk alternatif pemantauan kualitas udara yang lebih efisien dan meminimalisasi biaya.
4. Manfaat bagi masyarakat umum.
 Penelitian ini bermanfaat untuk menambah pengetahuan bagi masyarakat umum mengenai kredibilitas data kualitas udara terkhusus konsentrasi PM_{10} dan CO berdasarkan citra satelit.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

1. Penelitian ini berfokus pada parameter PM_{10} dan CO
2. Lokasi dalam penelitian ini adalah kawasan industri PT. Semen Tonasa
3. Penelitian ini menggunakan data pengukuran langsung yang bersumber dari PT. Semen Tonasa
4. Analisis konsentrasi PM_{10} dan CO yang digunakan berdasarkan Citra Satelit Sentinel 2
5. Pengambilan data raster citra Sentinel 2 melalui Sentinel Hub EO
6. Data konsentrasi PM_{10} dan CO pada penelitian ini diambil pada periode triwulan 3 di bulan Agustus 2023 dan triwulan 4 November 2024.
7. Penelitian ini mencakup tahap validasi ISPU antara citra satelit dan pengukuran langsung.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Udara

Menurut Undang-undang Republik Indonesia No. 11 Tahun 2020, pencemaran lingkungan hidup adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan.

Menurut Undang-undang Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021, pencemaran udara adalah masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam Udara Ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui Baku Mutu Udara Ambien yang telah ditetapkan.

Berdasarkan informasi yang dikutip dari NAFAS (Primastiti, 2022) Sumber pencemar udara dapat digolongkan menjadi dua, yaitu:

a. Sumber alamiah

Pencemaran udara sumber alamiah merupakan pencemaran udara yang terjadi secara alami tanpa adanya unsur kesengajaan maupun dampak dari aktifitas manusia. Contoh dari pencemaran udara sumber alamiah yaitu akibat dari letusan gunung berapi yang menghasilkan polutan pencemar salah satunya SO_x . Selain itu, kebakaran hutan juga merupakan salah satu contoh pencemaran udara secara alami yang menghasilkan bahan pencemar berupa HC, CO_2 , SO, NO dan NO_2 .

b. Sumber kegiatan manusia

Pencemaran udara yang bersumber dari kegiatan manusia dibagi menjadi dua, yaitu:

1) Sumber bergerak

Sumber bergerak merupakan sumber emisi yang dinamis, atau dengan kata lain sumber ini tidak menetap pada satu titik, contohnya seperti emisi lalu lintas yang diakibatkan oleh kendaraan bermotor. Emisi tersebut menghasilkan bahan pencemar berupa HC, SO_2 , CO dan lainnya.

2) Sumber titik

Pencemaran udara sumber titik merupakan sumber pencemar yang spesifik di suatu lingkungan dengan ruang lingkup yang kecil. Contoh dari pencemaran udara sumber titik, seperti cerobong asap yang dihasilkan dari suatu industri contohnya pembangkit listrik tenaga uap maupun proses pembakaran lainnya yang menggunakan bahan bakar batu bara.

3) Sumber area

Sumber area adalah wilayah yang di dalamnya terdapat kegiatan yang menghasilkan polusi udara, seperti area industri, kota yang padat. Sumber area mewakili berbagai kegiatan individu yang mengeluarkan sejumlah kecil pencemar, namun secara kolektif kontribusinya menjadi signifikan. Misalnya, satu tungku pembakaran di industri rumah tangga di dalam wilayah inventarisasi tidak memenuhi kualifikasi sebagai sumber titik, namun secara kolektif emisi dari sejumlah fasilitas yang sama di wilayah tersebut akan signifikan sehingga sejumlah fasilitas tersebut harus diinventarisir sebagai sumber area.

2.2 Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) adalah angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika, dan makhluk hidup lainnya.

Secara nasional program pengendalian pencemaran udara adalah Program Langit Biru (PLB) yang dirancang pada tanggal 6 Agustus 1996 di Semarang oleh Menteri Negara Lingkungan Hidup dan selanjutnya ditetapkan sebagai Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 15 Tahun 1996 tentang Program Langit Biru. Pendekatan yang dilakukan dalam pelaksanaan Program Langit Biru difokuskan pada:

1. Pengendalian pencemaran udara dari sumber bergerak
2. Pengendalian pencemaran udara dari sumber tak bergerak.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 14 Tahun 2020 ini merupakan pengganti dari Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 45 tahun 1997 tentang Perhitungan dan Pelaporan serta Informasi Indeks Standar Pencemar Udara. Keputusan tersebut terdapat beberapa perubahan, seperti penambahan dua parameter pencemar yaitu HC dan PM_{2,5}. Penambahan tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan besarnya resiko terhadap kesehatan manusia.

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 14 Tahun 2020, tata cara perhitungan ISPU menggunakan persamaan:

$$I = \frac{(Ia - Ib)}{(Xa - Xb)}(X_x - X_b) + Ib \quad (1)$$

Keterangan:

I = ISPU terhitung

Ia = ISPU batas atas

Ib = ISPU batas bawah

X_a = Konsentrasi Ambien batas atas (µg/m³)

X_b = Konsentrasi Ambien batas bawah (µg/m³)

X_x = Konsentrasi Ambien nyata hasil pengukuran (µg/m³)

Berikut tabel disajikan tabel konversi nilai konsentrasi parameter ISPU.

Tabel 1. Konversi nilai konsentrasi parameter ISPU.

ISPU	24 Jam Partikulat (PM ₁₀) µg/m ³	24 Jam Partikulat (PM _{2,5}) µg/m ³	24 Jam Sulfur Dioksida (SO ₂) µg/m ³	24 Jam Karbon Monoksida (CO) µg/m ³	24 Jam Ozon (O ₃) µg/m ³	24 jam Nitrogen Dioksida (NO ₂) µg/m ³	24 Jam Hidrokarbon (HC) µg/m ³
0-50	50	15,5	52	4000	120	80	45
51-100	150	55,4	180	8000	235	200	100
101- 200	350	150,4	400	15000	400	1130	215
201- 300	420	250,4	800	30000	800	2260	432

ISPU	24 Jam	24 Jam	24 Jam	24 Jam	24 Jam	24 jam	24 Jam
	Partikulat	Partikulat	Sulfur	Karbon	Ozon	Nitrogen	Hidrokarbon
	(PM ₁₀)	(PM _{2.5})	Dioksida	Monoksida	(O ₃)	Dioksida	(HC) µg/m ³
	µg/m ³	µg/m ³	(SO ₂)	(CO)	µg/m ³	(NO ₂)	
			µg/m ³	µg/m ³		µg/m ³	
>300	500	500	1200	45000	1000	3000	648

Keterangan :

- Data hasil pengukuran selama 24 jam secara terus menerus
- Hasil perhitungan ISPU parameter partikulat (PM_{2.5}) disampaikan tiap jam selama 24 jam. Hasil perhitungan ISPU parameter Partikula (PM₁₀), Sulfur dioksida (SO₂), Karbon Monoksida (CO), Ozon (O₃), Nitrogen Dioksida (NO₂) dan Hidrokarbon (HC), diambil nilai ISPU parameter tertinggi dan paling sedikit disampaikan setiap jam 09.00 dan jam 15.00

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020

Sebagai bentuk informasi terkait kategori ISPU, berikut disajikan kategori Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU).

Tabel 2. Kategori Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU).

Kategori	Status Warna	Angka Rentang	Keterangan
Baik	Hijau	1 - 50	Tingkat Kualitas Udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan, tumbuhan.
Sedang	Biru	51 – 100	Tingkat Kualitas Udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan.
Tidak Sehat	Kuning	101 – 200	Tingkat kualitas udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan
Sangat Tidak Sehat	Merah	201 – 300	Tingkat Kualitas udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar
Berbahaya	Hitam	≥ 301	Tingkat Kualitas udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan penanganan cepat

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020

2.3 Udara Ambien

Menurut Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, udara ambien

adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfer yang berada di dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan berpengaruh terhadap Kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya.

Udara ambien adalah udara yang memiliki komposisi umum di lapisan troposfer dan mempengaruhi makhluk hidup yang membutuhkan udara dan unsur-unsur yang ada di lingkungan.

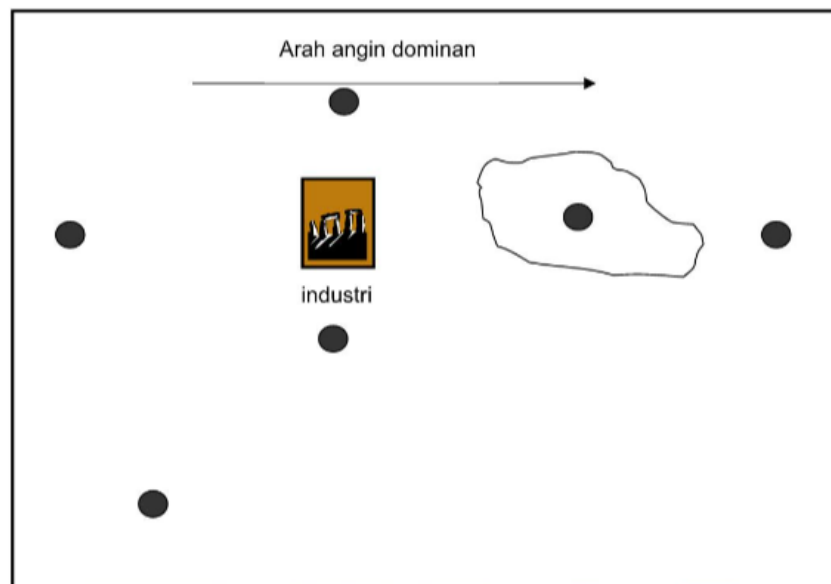
Menurut Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021, baku mutu udara ambien adalah nilai pencemar udara yang ditenggang keberadaannya dalam Udara Ambien. Udara yang melebihi baku mutu dapat merusak lingkungan sekitarnya dan berpotensi mengganggu kesehatan masyarakat sekitarnya. Pencemaran udara ambien dirasakan semakin hari semakin meningkat, terutama di kawasan perumahan, kawasan industri, dan kawasan padat lalu lintas, dimana di kawasan tersebut banyak terjadi kegiatan manusia. Pencemaran udara ambien dapat pula menimbulkan dampak terhadap lingkungan alam, seperti hujan asam, penipisan lapisan ozon, dan pemanasan global.

Berdasarkan SNI 19-7119.6-2005 tentang Udara Ambien. Prinsip pengambilan contoh uji kualitas udara ambien harus memenuhi kriteria berikut:

- a) Area dengan konsentrasi pencemar tinggi. Daerah yang didahulukan untuk dipantau hendaknya daerah-daerah dengan konsentrasi pencemar yang tinggi. Satu atau lebih stasiun pemantau mungkin dibutuhkan di sekitar daerah yang emisinya besar.
- b) Area dengan kepadatan penduduk tinggi. Daerah-daerah dengan kepadatan penduduk yang tinggi, terutama ketikaterjadi pencemaran yang berat.
- c) Di daerah sekitar lokasi penelitian yang diperuntukkan untuk kawasan studi maka stasiun pengambil contoh uji perlu ditempatkan di sekeliling daerah/kawasan.
- d) Di daerah proyeksi. Untuk menentukan efek akibat perkembangan mendatang di lingkungannya, stasiun perlu juga ditempatkan di daerah-daerah yang diproyeksikan.
- e) Mewakili seluruh wilayah studi. Informasi kualitas udara di seluruh wilayah studi harus diperoleh agar kualitas udara di seluruh wilayah dapat dipantau (dievaluasi).

Selain itu, persyaratan pemilihan lokasi juga harus sesuai dengan kriteria SNI 19-7119.6-2005. Berikut beberapa petunjuk yang dapat digunakan dalam pemilihan titik pengambilan contoh uji adalah:

- Hindari tempat yang dapat merubah konsentrasi akibat adanya absorpsi, atau adsorpsi (seperti dekat dengan gedung-gedung atau pohon-pohonan).
- Hindari tempat dimana pengganggu kimia terhadap bahan pencemar yang akan diukur dapat terjadi: emisi dari kendaraan bermotor yang dapat mengotori pada saat mengukur ozon, amoniak dari pabrik *refrigerant* yang dapat mengotori pada saat mengukur gas-gas asam.
- Hindari tempat dimana pengganggu fisika dapat menghasilkan suatu hasil yang mengganggu pada saat mengukur debu (*partikulat matter*) tidak boleh dekat dengan incinerator baik domestic maupun komersial, gangguan listrik terhadap peralatan pengambil contoh uji dari jaringan listrik tegangan tinggi
- Letakkan peralatan di daerah dengan gedung/bangunan yang rendah dan saling berjauhan.
- Apabila pemantauan bersifat kontinyu, maka pemilihan lokasi harus mempertimbangkan perubahan kondisi peruntukan pada masa dating.



Gambar 1. Skema Penetapan Lokasi Pemantauan Kualitas Udara Ambien

2.4 Partikulat Matter PM₁₀

PM₁₀ merupakan partikel udara yang berukuran lebih kecil dari 10 mikron (mikrometer). PM₁₀ berasal dari proses perpisahan suatu bahan secara mekanik, seperti proses penghancuran, penggilingan dan peledakan. Proses penghancuran dan penggilingan bahan dilakukan pada pabrik semen, seperti yang terjadi pada bagian mill dan kiln, akan menghasilkan PM₁₀. Partikel debu (PM₁₀) merupakan salah satu polutan yang apabila terhisap langsung ke dalam paru-paru dan mengendap di alveoli dapat membahayakan sistem pernafasan.

PM₁₀ merupakan partikel udara dalam wujud padat yang berdiameter kurang dari 10 μm . Partikel tersebut akan berada di udara untuk waktu yang relatif lama dalam keadaan melayang-layang dan masuk ke dalam tubuh manusia melalui saluran pernafasan sehingga dapat menyebabkan gangguan Kesehatan (Roza, dkk., 2015). Sebaran PM₁₀ di udara dipengaruhi oleh kondisi sumber pencemar serta oleh proses fisik dan kimiawi pencemar tersebut di atmosfer. Bahan pencemar ini akan terbawa oleh angin dan akan berakumulasi di tempat tujuan arah angin tersebut. Pencemar partikulat apabila terhirup dalam jumlah banyak dalam waktu yang lama dapat menyebabkan kerusakan fungsi organ pernapasan.

Berdasarkan SNI 7119.15:2016, prinsip pengambilan sampel dilakukan dengan cara udara diambil melalui inlet selektif PM₁₀ dan dilewatkan pada filter dengan ukuran 20,3 cm x 25,4 cm (8 in x 10 in) dan efisiensi penyaringan minimum 98,5% setara dengan porositas 0,3 μm pada kecepatan aliran 1,1 m³/menit sampai dengan 1,7 m³/menit selama 24 jam $\pm$ 1 jam. Jumlah partikel yang terakumulasi dalam filter dianalisa secara gravimetri. Hasilnya ditampilkan dalam bentuk satuan massa partikulat yang terkumpul per satuan volume contoh uji udara yang diambil sebagai $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

2.5 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) adalah suatu gas tidak berwarna, tidak berbau yang dihasilkan oleh pembakaran tidak sempurna, material yang mengandung zat arang atau bahan organik, baik dalam alur pengolahan hasil jadi industri, ataupun proses di alam lingkungan. Ia terdiri dari satu atom karbon yang secara kovalen berikatan

dengan satu atom oksigen. Dalam ikatan ini, terdapat dua ikatan kovalen dan satu ikatan kovalen koordinasi antara atom karbon dan oksigen. Gas CO sebagian besar berasal dari pembakaran bahan fosil dengan udara, berupa gas buangan seperti kegiatan di produksi di pabrik semen maupun kegiatan transportasi di sekitar area industri. Karbon monoksida merupakan salah satu polutan pencemar terbesar di udara bebas. Sumber pencemar dari polutan CO ini sebagian besar diakibatkan oleh emisi dari kendaraan bermotor (Maharani, 2019).

Gas CO dilepaskan akibat adanya aktifitas pembakaran. Sumber gas CO di udara adalah mobil, truk dan kendaraan lainnya atau mesin yang membakar bahan bakar fosil. Tidak hanya itu, namun beberapa barang yang ada di rumah seperti pemanas ruangan dengan minyak tanah, cerobong asap, dan tungku yang bocor serta kompos gas merupakan benda-benda yang dapat melepaskan gas CO di dalam ruangan (Rizaldi, dkk., 2022).

Formasi CO merupakan fungsi dari rasio kebutuhan udara dan bahan bakar dalam proses pembakaran di dalam ruang bakar mesin diesel. Percampuran yang baik antara udara dan bahan bakar terutama yang terjadi pada mesin-mesin yang menggunakan turbocharge merupakan salah satu strategi untuk meminimalkan emisi CO (Wahyu, 2012). Sumber pencemar gas CO yang terbesar, berdasarkan hasil penelitian di negara-negara industri berasal dari pemakaian bahan bakar fosil (minyak dan batu bara) pada mesin-mesin penggerak transportasi. Hal ini dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 3. Persentase Sumber Pencemar CO

Sumber Pencemar Karbon Monoksida (CO)	Jumlah Persentase (%)
Transportasi	63,8
Pembakaran Stasioner	1,9
Proses Industri	9,6
Pembuangan Limbah Padat	7,8

Sumber: Muchtar, 2018

2.6 Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh dalam estimasi kualitas udara merujuk pada penggunaan teknologi penginderaan jauh untuk memantau dan menganalisis kondisi udara di suatu wilayah. Ini melibatkan penggunaan sensor pada pesawat udara atau satelit untuk mengumpulkan data tentang komposisi atmosfer, termasuk konsentrasi polutan seperti partikel PM_{2.5}, PM₁₀, Ozon, Nitrogen Dioksida, dan lainnya. Data ini kemudian diproses dan dianalisis untuk mengevaluasi kualitas udara, mengidentifikasi polusi udara, dan memantau tren perubahan dalam jangka waktu tertentu.

Penginderaan jauh kualitas udara memberikan keuntungan dalam mendapatkan informasi tentang polusi udara secara luas dan secara periodik, terutama di daerah yang sulit dijangkau secara langsung. Informasi yang diperoleh dari penginderaan jauh dapat digunakan untuk mengambil keputusan terkait mitigasi polusi udara, memonitor kepatuhan terhadap regulasi lingkungan, dan menyediakan data dasar untuk penelitian dan perencanaan lingkungan.

Dalam berbagai sektor, seperti pembangunan, lingkungan, kesehatan, ekonomi, dan lain-lain, terdapat kebutuhan yang penting akan data citra satelit yang bebas awan dan memiliki minim tutupan awan. Hal ini merupakan kebutuhan yang diperlukan untuk memenuhi berbagai keperluan, sebagaimana diamanatkan dalam Undang-Undang No. 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan, Pasal 20 Undang-undang tersebut menetapkan kewajiban bagi Badan Penerbangan dan Antariksa Nasional untuk menyediakan data penginderaan jauh setiap tahun dengan cakupan awan minimal dan bebas awan untuk seluruh wilayah Indonesia, serta memberikan informasi terkait kualitas citra yang disediakan. LAPAN, melalui Pusat Teknologi dan Data Penginderaan Jauh (Pustekdata), memperoleh data citra satelit optik yang memiliki resolusi yang beragam, mulai dari rendah, menengah, tinggi, hingga sangat tinggi (Hestrio, Y.F., dkk., 2021).

Penginderaan jauh memiliki fungsi untuk memperoleh informasi permukaan bumi dari jarak tertentu. penginderaan jauh yang dalam bahasa Inggris disebut dengan *remote sensing*, memiliki definisi sebagai suatu keilmuan untuk memperoleh informasi data suatu objek melalui suatu alat, dimana alat tersebut tanpa melakukan kontak langsung dengan objek yang dikaji atau diukur.

Data tersebut diperoleh menggunakan berbagai macam alat, dapat berupa sensor ataupun optik kamera yang dipasang pada satelit dan wahana terbang seperti balon udara, helikopter, pesawat, dan pesawat tanpa awak (*Drone*) atau kombinasi semuanya untuk akurasi data. Kemudian data di akuisisi oleh stasiun bumi atau antena penerima sinyal untuk selanjutnya disimpan dalam sistem Bank Data Penginderaan Jauh Nasional (BDPJN).

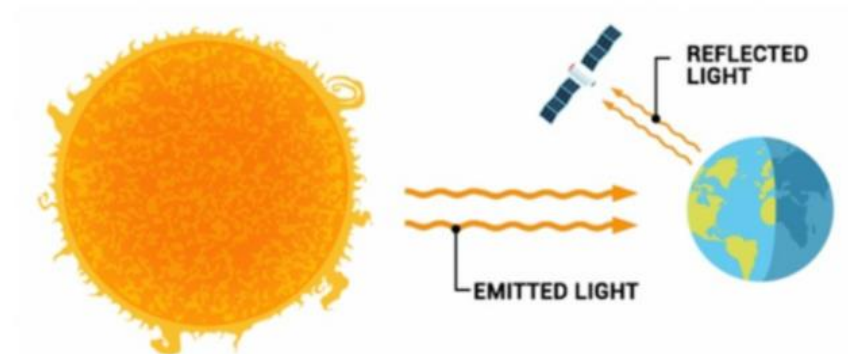
Data penginderaan jauh dari satelit memiliki resolusi yang beragam. Mulai dari ukuran 1 titik piksel dapat mewakili ukuran 1 x 1 km, biasa disebut dengan data citra satelit resolusi rendah. Kemudian untuk citra satelit resolusi menengah, dapat mewakili ukuran 30 x 30 m. Lanjut ke data resolusi tinggi, dapat mewakili sekitar antara 1 - 4 m. Untuk data citra satelit dengan resolusi sangat tinggi, dalam 1 piksel dapat mewakili hingga besaran sentimeter, sehingga objek yang diamati dapat terlihat lebih jelas. Beragam resolusi tersebut semuanya dibutuhkan karena memiliki fungsi dan perannya masing-masing. Data citra satelit beresolusi rendah dapat mengamati bumi dengan sudut pandang yang lebih luas. Sehingga dapat melihat pergerakan awan secara menyeluruh seperti pada data citra satelit Himawari-8 yang memiliki misi pemantauan cuaca. Sedangkan data citra resolusi menengah hingga sangat tinggi berguna untuk pemetaan detil seperti pemantauan sumber daya alam (SDA), tata ruang, lingkungan, keamanan, dan sebagainya (BRIN, 2022).



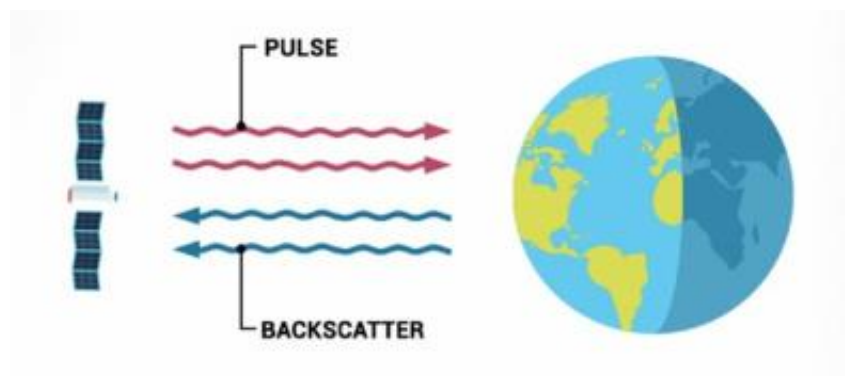
Gambar 2. Komponen Penginderaan Jauh

a) Komponen Penginderaan Jauh

Sistem penginderaan jauh memerlukan komponen sebagai pendukung tercapainya tujuan penginderaan jauh. Komponen-komponen tersebut saling berkaitan dan berinteraksi dalam merekam objek dan menyalurkan data hasil rekaman berupa citra ke pengolah data untuk menghasilkan informasi sesuai kebutuhan. Komponen-komponen penginderaan jauh meliputi sumber tenaga, atmosfer, interaksi antara tenaga dengan objek, objek, sensor, wahana, perolehan data, dan penggunaan data (Lillesand, Kiefir, dan Chipman, 2015).



Gambar 3. Sistem Pasif Penginderaan Jauh



Gambar 4. Sistem Aktif Penginderaan Jauh

b) Sumber tenaga

Sumber tenaga dalam penginderaan jauh terbagi menjadi dua, yaitu tenaga pasif yang berupa matahari dan tenaga aktif yang berupa satelit. Sumber tenaga ini berperan dalam memancarkan energi untuk objek.

c) Atmosfer

Atmosfer berperan dalam menghantarkan energi dari sumber tenaga ke objek.

d) Interaksi

Dalam komponen penginderaan jauh, interaksi antara tenaga dengan objek berpengaruh terhadap Tingkat kecerahan dari objek.

e) Sensor

Sensor merupakan perekam objek yang terbagi menjadi dua sensor, sensor fotografi dan sensor non fotografi atau sensor satelit. Hasil dari perekaman sensor disebut citra.

f) Wahana

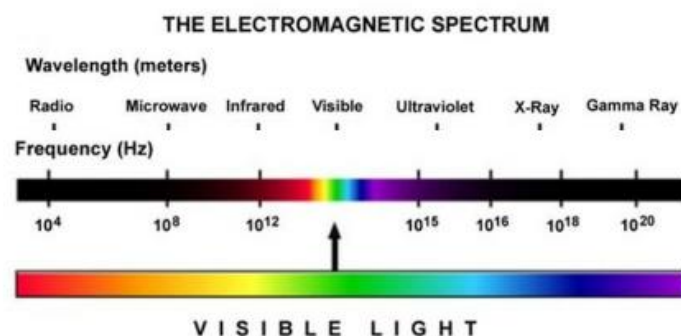
Wahana dalam penginderaan jauh berfungsi untuk membawa sensor untuk menjalankan tugasnya. Wahana dapat berupa pesawat udara, balon udara, atau pesawat ulak-alik.

g) Perolehan data

Perolehan data hasil perekaman data terdiri dari dua, pertama data yang diperoleh dengan interpretasi manual dan data yang diperoleh secara digital melalui perangkat computer.

h) Penggunaan data

Dalam penginderaan jauh, penggunaan data dimanfaatkan oleh manusia untuk menentukan kualitas citra penginderaan jauh sebagai analisis keruangan seperti pada bidang kehutanan, pertanian, penggunaan lahan, dan lainnya.



Gambar 5. Spektrum Elektromagnetik dalam Penginderaan Jauh

i) Koreksi radiometrik

Menurut Ambodo dan Jatmiko, 2012, koreksi radiometrik citra diperlukan untuk meningkatkan kualitas visual citra serta untuk memastikan nilai piksel mencerminkan pantulan yang sebenarnya dari objek yang dipantulkan. Beberapa

faktor yang menyebabkan distorsi radiometrik pada sensor pasif termasuk kondisi atmosfer dan pencahayaan matahari. Koreksi radiometrik diperlukan untuk mengatasi kesalahan respons detektor dan pengaruh atmosfer yang dapat mengganggu kualitas visual citra dan nilai spektralnya. Kesalahan radiometrik yang diperbaiki untuk meningkatkan kualitas visual citra mencakup pengisian kembali baris yang kosong karena kehilangan baris atau kesalahan awal pemindaian. Baris atau bagian baris yang memiliki nilai yang tidak sesuai dapat diperbaiki dengan mengambil rata-rata nilai piksel dari baris yang berdekatan di atas dan di bawahnya.

2.7 Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah sebuah sistem yang dirancang untuk menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menampilkan data geografis atau spasial. Data yang dimaksud mencakup informasi tentang lokasi, baik dalam bentuk koordinat geografis (seperti lintang dan bujur) maupun atribut lain yang terkait dengan lokasi tersebut.

SIG mengintegrasikan teknologi informasi dengan data geografis untuk memberikan pemahaman yang lebih baik tentang hubungan spasial antara berbagai fenomena geografis. Dengan menggunakan SIG, pengguna dapat membuat peta, menganalisis pola spasial, membuat keputusan berbasis lokasi, dan memahami lebih dalam tentang geografi suatu daerah.

Contoh penggunaan SIG meliputi pemetaan wilayah, perencanaan perkotaan, manajemen sumber daya alam, pemantauan lingkungan, analisis risiko bencana, serta navigasi dan pemetaan rute.

2.8 Satelit Sentinel 2

Sentinel-2, diluncurkan sebagai bagian dari program Copernicus Komisi Eropa pada tanggal 23 Juni 2015, dirancang khusus untuk memberikan banyak data dan citra. Satelit ini dilengkapi dengan sensor multispektral optoelektronik untuk survei dengan resolusi sentinel-2 10 hingga 60 m di zona spektral tampak, inframerah dekat (VNIR), dan inframerah gelombang pendek (SWIR), termasuk 13 saluran spektral, yang memastikan tertangkapnya perbedaan kondisi vegetasi,

termasuk perubahan waktu, dan juga meminimalkan dampak terhadap kualitas fotografi atmosfer.

Misi ini memiliki satelit yang mengorbit pada ketinggian rata-rata 785 km. Dengan dua satelit dalam misi tersebut, survei dapat dilakukan secara berkala setiap 5 hari di kawasan khatulistiwa dan setiap 2-3 hari di daerah lintang tengah. Data yang dihasilkan oleh Sentinel-2 mendukung program GMES (Pemantauan Global untuk Lingkungan dan Keamanan). Program ini merupakan kerjasama antara layanan Komisi Eropa dan ESA terkait dengan pengelolaan lahan, produksi pertanian dan kehutanan, serta pemantauan bencana alam dan operasi kemanusiaan.

Misi Sentinel-2 terdiri dari dua satelit identik, Sentinel-2A dan Sentinel-2B, yang diluncurkan menggunakan peluncur VEGA Eropa. Masing-masing satelit ini memiliki berat sekitar 1,2 ton. Umur satelit adalah 7,25 tahun, yang mencakup fase komisioning di orbit selama 3 bulan. Baterai dan propelan telah disediakan untuk mengakomodasi operasi selama 12 tahun, termasuk manuver de-orbiting yang sudah habis masa pakainya.

Kedua satelit Sentinel-2 beroperasi secara bersamaan, secara bertahap pada sudut 180° satu sama lain, dalam orbit sinkron matahari pada ketinggian rata-rata 786 km. Posisi setiap satelit Sentinel-2 pada orbitnya diukur dengan penerima Sistem Satelit Navigasi Global (GNSS) frekuensi ganda. Akurasi orbit dipertahankan oleh sistem propulsi khusus. Sistem satelit Sentinel-2 dikembangkan oleh konsorsium industri yang dipimpin oleh Astrium GmbH (Jerman). Astrium SAS (Prancis) bertanggung jawab atas *Instrumen MultiSpectral* (MSI).

MSI bekerja secara pasif, dengan mengumpulkan sinar matahari yang dipantulkan dari Bumi. Data baru diperoleh oleh instrumen saat satelit bergerak di sepanjang jalur orbitnya. Sinar cahaya yang masuk dipisahkan melalui pemecah sinar dan difokuskan ke dua kumpulan bidang fokus terpisah di dalam instrumen; satu untuk pita *Visible* dan *Near-Infra-Red* (VNIR) dan satu lagi untuk pita *Short Wave Infra-Red* (SWIR). Pemisahan spektral setiap pita menjadi panjang gelombang individual dilakukan dengan filter garis yang dipasang di atas detektor.



Gambar 6. Tampilan Skema Pesawat Luar Angkasa Sentinel-2

Desain optik teleskop MSI memungkinkan *Field Of View* (FOV) sepanjang 290 km. Mekanisme rana mencegah instrumen dari penerangan langsung matahari di orbit dan untuk menghindari kontaminasi selama peluncuran. Mekanisme yang sama berfungsi sebagai alat kalibrasi dengan mengumpulkan sinar matahari setelah dipantulkan oleh *diffuser*.

a) Orbit

Orbit misi Sentinel-2 sinkron dengan matahari. Orbit sinkron matahari digunakan untuk memastikan sudut sinar matahari pada permukaan bumi tetap terjaga secara konsisten. Terlepas dari variasi musiman yang kecil, penempatan orbit satelit ke sudut matahari meminimalkan potensi dampak bayangan dan tingkat pencahayaan di permukaan bumi. Hal ini memastikan konsistensi dari waktu ke waktu dan sangat penting dalam menilai data deret waktu.

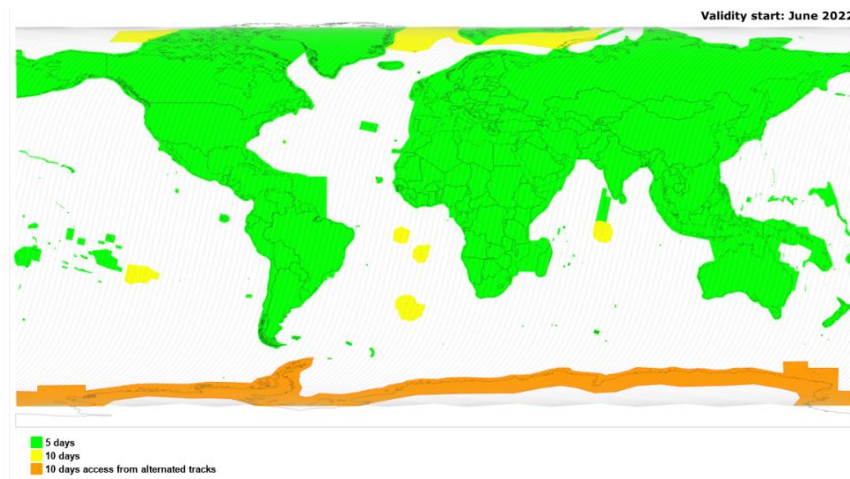
Sentinel-2A dan Sentinel-2B menempati orbit yang sama dengan jarak 180 derajat. Ketinggian orbit rata-rata adalah 786 km. Kemiringan orbitnya adalah $98,62^\circ$ dan Waktu Matahari Lokal Rata-rata (MLST) pada titik menurun adalah 10:30 (pagi). Nilai MLST ini dipilih sebagai kompromi antara tingkat penerangan matahari yang sesuai dan minimalisasi potensi tutupan awan. Nilai MLST mendekati waktu layang lokal Landsat dan hampir identik dengan SPOT-5, sehingga memungkinkan integrasi data Sentinel-2 dengan misi yang ada dan historis, serta berkontribusi terhadap pengumpulan data rangkaian waktu jangka panjang.

b) Cakupan Geografis

Misi Sentinel-2 akan memberikan cakupan sistematis pada bidang-bidang berikut:

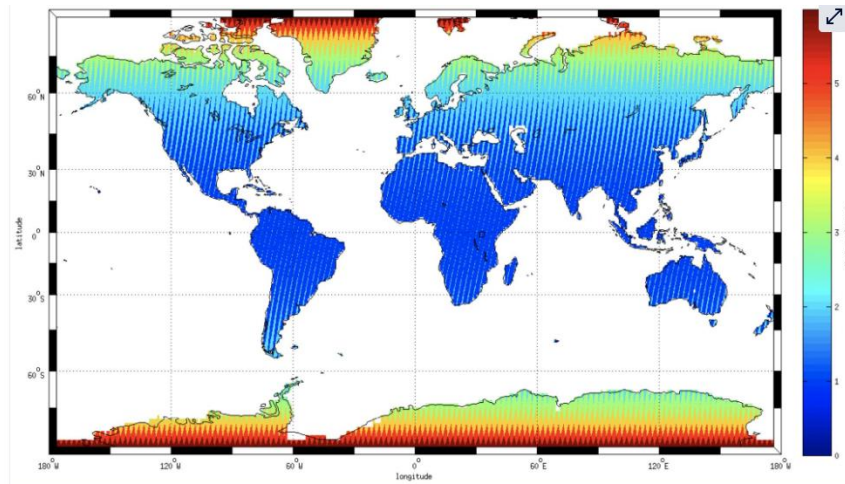
- Seluruh permukaan daratan benua (termasuk perairan pedalaman) antara garis lintang 56° Selatan dan $82,8^{\circ}$ Utara
- Semua perairan pantai sampai dengan 20 km dari pantai
- Semua pulau yang luasnya lebih dari 100 km^2
- Semua pulau UE
- Laut Mediterania
- Semua laut tertutup (misalnya Laut Kaspia)

Selain itu, skenario observasi Sentinel-2 mencakup observasi yang mengikuti permintaan negara-negara anggota atau Layanan Copernicus (misalnya Antartika, Teluk Baffin).



Gambar 7. Ilustrasi cakupan dan waktu kunjungan kembali yang diperkirakan untuk akuisisi Sentinel-2 MSI.

Dengan dua satelit, seluruh area reguler yang disebutkan di atas akan dikunjungi kembali setiap lima hari dalam kondisi tampilan yang sama. Karena tumpang tindih antar petak dari orbit yang berdekatan, frekuensi kunjungan ulang akan meningkat dengan kondisi pengamatan yang berbeda.



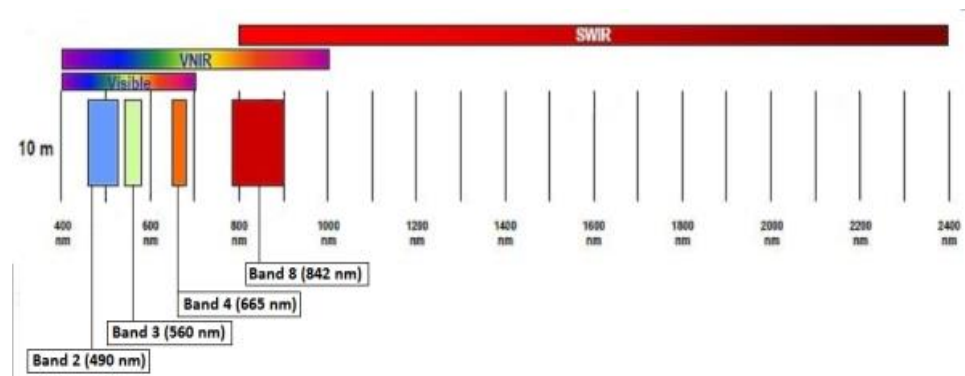
Gambar 8. Frekuensi kunjungan ulang geometrik akibat tumpang tindih antara orbit yang berdekatan

c) Resolusi Akuisisi

Resolusi Misi Sentinel-2 dan instrumen MSI muatannya adalah:

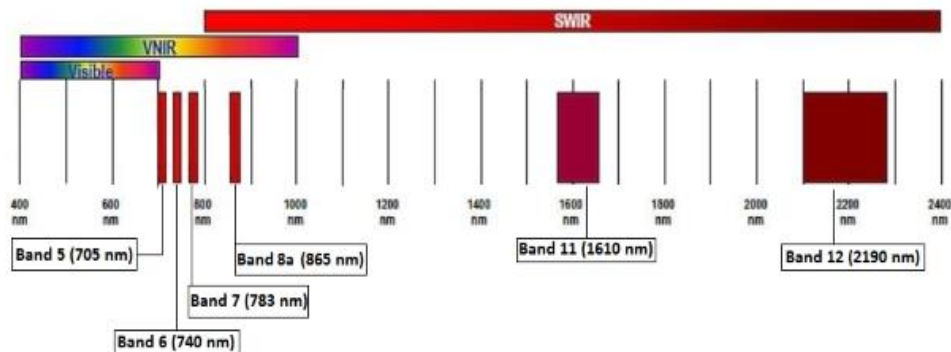
1. Resolusi temporal suatu satelit di orbit adalah frekuensi kunjungan kembali satelit ke lokasi tertentu. Frekuensi kunjungan ulang setiap satelit Sentinel-2 adalah 10 hari dan kunjungan ulang konstelasi gabungan adalah 5 hari.
2. Resolusi spasial suatu instrumen adalah representasi detektor individu dalam susunan sensor satelit di lapangan. Detail mengenai resolusi spasial resolusi instrumen MSI disediakan di bagian Resolusi Spasial. Resolusi spasial Sentinel-2 bergantung pada pita spektral tertentu:

- **Resolusi spasial 10 meter**



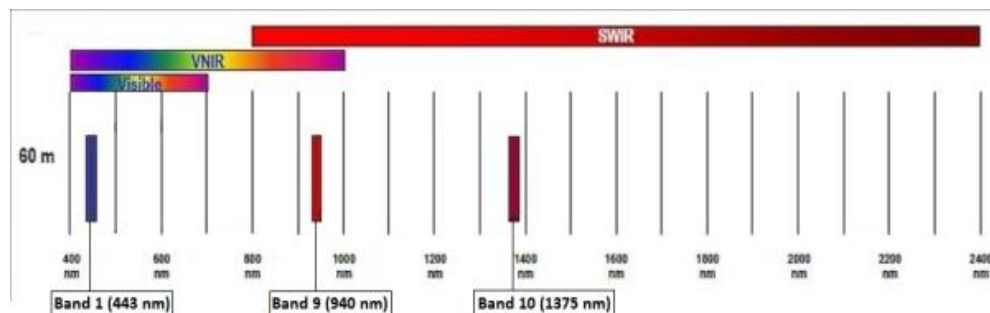
Gambar 9. Pita resolusi spasial Sentinel-2 10 m

- **Resolusi spasial 20 meter**



Gambar 10. Pita resolusi spasial Sentinel-2 20 m

- **Resolusi spasial 60 meter**



Gambar 11. Pita resolusi spasial Sentinel-2 60 m

3. Resolusi spektral didefinisikan sebagai ukuran kemampuan instrumen untuk membedakan fitur dalam spektrum elektromagnetik.

Resolusi spektral didefinisikan sebagai ukuran kemampuan instrumen untuk membedakan fitur dalam spektrum elektromagnetik.

4. Resolusi radiometrik suatu instrumen adalah penentuan tingkat tambahan intensitas atau reflektansi yang dapat diwakili atau dibedakan oleh sistem. Semakin tinggi resolusi radiometrik, semakin mampu perangkat mendeteksi perbedaan intensitas atau reflektansi

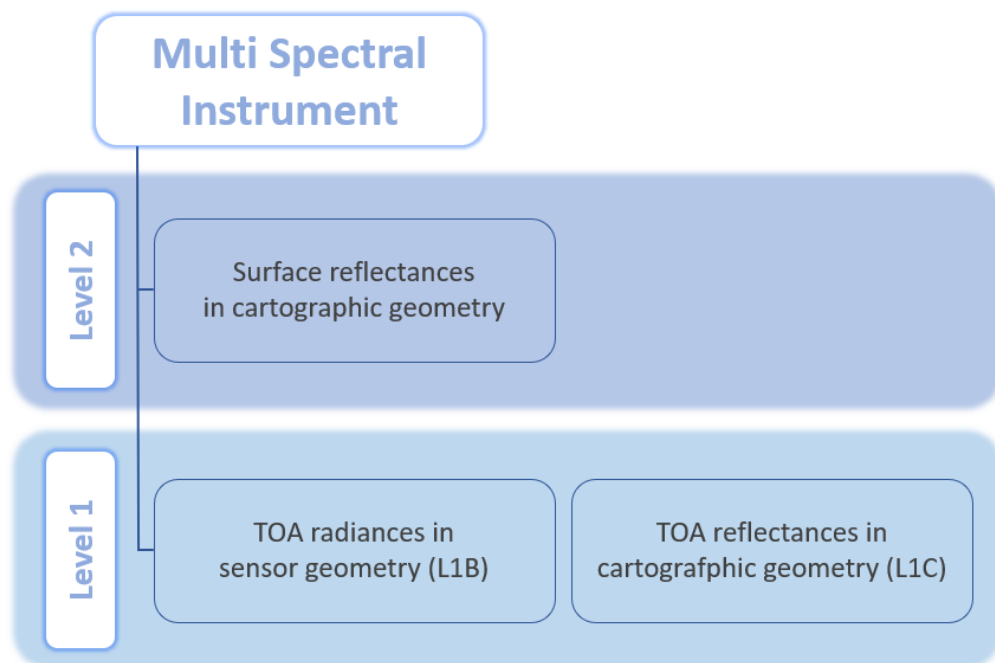
Resolusi radiometrik adalah kapasitas instrumen untuk membedakan perbedaan intensitas cahaya atau reflektansi. Semakin besar resolusi radiometrik, semakin akurat citra yang dihasilkan. Resolusi radiometrik secara rutin dinyatakan sebagai angka bit, biasanya berkisar antara 8 hingga 16 bit. Resolusi radiometrik instrumen MSI adalah 12 bit (Instrumen Sentinel-2 memperoleh pengukuran pada 12 bit. Pengukuran ini diubah menjadi reflektansi dan disimpan sebagai bilangan bulat 16 bit

dalam produk S2), yang memungkinkan gambar diperoleh pada rentang nilai intensitas cahaya potensial 0 hingga 4095. Akurasi radiometrik kurang dari 5% (sasaran 3%). Resolusi radiometrik juga bergantung pada Rasio Sinyal terhadap Kebisingan (SNR) detektor.

5. Lebar lintasan Sentinel-2 adalah 290 km. Sebagai perbandingan, lebar petak Landsat 5 TM dan Landsat 7 ETM+ adalah 185 km, dan lebar petak SPOT-5 adalah 120 km.

d) Produk data Sentinel 2

Produk Sentinel-2 yang tersedia bagi pengguna adalah Level-1C (Reflektansi puncak atmosfer dalam geometri kartografi) dan Level-2A (Reflektansi permukaan yang dikoreksi secara atmosfer dalam geometri kartografi). Berikut gambar Representasi grafis produk Sentinel-2.



Gambar 12. Representasi Grafis Produk Inti Sentinel-2

2.9 Coal Stock

Proses pengadaan batubara dimulai dengan pemilihan pemasok yang memenuhi standar kualitas dan harga yang diinginkan. Pabrik semen harus memastikan bahwa batubara yang dibeli memiliki spesifikasi teknis yang sesuai, termasuk nilai kalor, kandungan sulfur, dan kelembaban. Pemilihan pemasok yang

tepat sangat penting untuk menghindari masalah kualitas yang dapat mempengaruhi proses pembakaran dan efisiensi energi (Young, M. L. S, 2011).

Setelah pengadaan, batubara diangkut ke pabrik semen menggunakan berbagai metode transportasi, seperti kereta api, truk, atau kapal. Setibanya di pabrik, batubara diterima di area penerimaan yang dilengkapi dengan fasilitas untuk memeriksa kualitas dan kuantitas batubara. Pengujian ini meliputi analisis kadar air, nilai kalor, dan kandungan sulfur untuk memastikan bahwa batubara sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan (Hodge, B. K., 2016).

Manajemen stok batubara melibatkan pemantauan terus-menerus terhadap level batubara yang tersisa di fasilitas penyimpanan. Sistem otomatis seperti sensor dan perangkat lunak manajemen stok digunakan untuk melacak dan merencanakan pengadaan batubara. Dengan menggunakan data historis dan proyeksi kebutuhan produksi, pabrik semen dapat merencanakan pengadaan batubara untuk memastikan pasokan yang cukup dan menghindari kekurangan (Parsons, D. M., 2018).

2.10 Cement Mill

Cement mill adalah bagian integral dari pabrik semen yang bertanggung jawab untuk menggiling klinker dan bahan tambahan menjadi semen bubuk. Proses ini sangat penting karena kualitas semen yang dihasilkan bergantung pada efisiensi dan akurasi penggilingan.

a. Penerimaan dan Penyiapan Klinker

Klinker yang dihasilkan dari proses pembakaran di kiln diterima di cement mill. Klinker adalah bahan baku utama yang dihasilkan dari proses pemanasan bahan mentah (seperti limestone, tanah liat, dan bahan tambahan) pada suhu tinggi. Klinker yang diterima harus diperiksa kualitasnya untuk memastikan kesesuaiannya sebelum diproses lebih lanjut. Klinker perlu disiapkan sebelum digiling, yang melibatkan pemecahan ukuran besar menjadi ukuran yang lebih kecil agar proses penggilingan lebih efisien. Ini biasanya dilakukan dengan menggunakan *crusher* atau *breaker* (Guo, H., 2015).

b. Penggilingan klinker

Klinker digiling dalam *cement mill* menggunakan *ball mill* atau *vertical roller mill* (VRM). Dalam *ball mill*, klinker dan media penggiling (bola baja) dicampur dan digiling bersama-sama hingga mencapai ukuran partikel yang diinginkan. VRM menggunakan rol yang berputar untuk menggiling klinker dengan proses yang lebih efisien dan energi yang lebih rendah. Selama proses penggilingan, bahan tambahan seperti gypsum, slag, atau *fly ash* ditambahkan untuk meningkatkan sifat semen, seperti waktu pengaturan dan kekuatan. Bahan tambahan ini dicampur secara merata dengan klinker untuk menghasilkan jenis semen yang diinginkan (Erdem, M., & Şen, S., 2020).

c. Pengendalian proses

Selama proses penggilingan, suhu dan kelembaban harus dikendalikan dengan hati-hati. Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aglomerasi, sementara kelembaban yang tinggi dapat mempengaruhi kualitas semen. Sistem pendingin dan pengukur kelembaban digunakan untuk menjaga kondisi yang optimal. Kualitas semen dipantau secara rutin dengan melakukan uji laboratorium untuk memastikan bahwa semen yang dihasilkan memenuhi spesifikasi yang diinginkan, termasuk kekuatan tekan, waktu pengaturan, dan ukuran partikel (Pan, Y., & Zhao, Y., 2018).

d. Penanganan limbah

Selama proses penggilingan, debu yang dihasilkan harus dikumpulkan dan dikelola dengan sistem pengendalian debu untuk meminimalkan dampak lingkungan dan menjaga kebersihan area kerja. Bahan sisa dari proses penggilingan, seperti abu atau produk sampingan, harus dikelola sesuai dengan peraturan lingkungan. Ini mungkin melibatkan daur ulang atau pembuangan yang aman (Saha, P., & Thomas, P., 2019).

2.11 Coal Mill

Di pabrik semen, *coal mill* dan *cement mill* menjalankan proses operasional yang berbeda sesuai dengan fungsi dan tujuan masing-masing. *Coal mill* bertugas menggiling batubara menjadi bubuk halus yang digunakan sebagai bahan bakar untuk kiln. Proses ini dimulai dengan penerimaan dan penyiapan batubara, diikuti

dengan penggilingan batubara menggunakan *ball mill* atau *vertical roller mill* (VRM), yang sering disertai dengan pengeringan untuk mengurangi kelembaban batubara. Kontrol suhu dan kelembaban yang ketat diperlukan untuk memastikan efisiensi penggilingan dan mencegah penggumpalan batubara. Setelah digiling, batubara bubuk disimpan dalam silo sebelum digunakan dalam kiln, dan sistem pengendalian debu diterapkan untuk mengelola limbah debu batubara.

Sebaliknya, *cement mill* fokus pada penggilingan klinker yang telah dibakar bersama dengan bahan tambahan seperti gypsum untuk menghasilkan semen. Proses di *cement mill* melibatkan penggunaan *ball mill* atau VRM untuk mencapai ukuran partikel semen yang diinginkan. Di sini, perhatian utama adalah pada kontrol kualitas semen, seperti kekuatan tekan dan ukuran partikel, serta penambahan bahan tambahan yang mempengaruhi sifat semen. Semen yang telah digiling kemudian disimpan dalam silo atau dikemas untuk distribusi. Berbeda dengan *coal mill*, *cement mill* mengelola debu semen dan limbah produksi dengan cara yang sesuai untuk memastikan kualitas produk akhir dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan.

Secara keseluruhan, meskipun kedua jenis mill ini terlibat dalam penggilingan material, mereka melayani tujuan yang berbeda dan memerlukan proses pengendalian serta penanganan yang spesifik untuk masing-masing material (Chen, M., & Liu, J., 2018).

2.12 Kiln

Di pabrik semen, kiln adalah komponen kritis dalam produksi yang berfungsi untuk mengubah campuran bahan mentah menjadi klinker, bahan baku utama semen. Proses ini melibatkan beberapa tahap utama:

a. Persiapan dan Pengumpanan Bahan Mentah

Bahan mentah utama untuk produksi semen adalah limestone (batu kapur), tanah liat, dan bahan tambahan lainnya seperti slag atau fly ash. Bahan-bahan ini dicampur dalam proporsi yang tepat untuk membentuk *raw meal*. Campuran *raw meal* dikirim ke kiln melalui sistem pengumpanan yang sering kali dilengkapi dengan alat pengukur untuk memastikan aliran bahan yang konsisten.

b. Pemanasan Awal (*Preheater*)

Setelah masuk ke kiln, raw meal pertama-tama dipanaskan dalam preheater. Di sini, bahan mentah dipanaskan oleh gas panas dari kiln untuk mengurangi energi yang diperlukan dalam proses pemanasan berikutnya. Preheater meningkatkan efisiensi kiln dengan mengurangi suhu awal yang diperlukan untuk proses kalsinasi. Kalsinasi (*Calcination*) dan Pembakaran

Di dalam kiln, raw meal mengalami proses kalsinasi di mana limestone terdekomposisi menjadi kalsium oksida dan karbon dioksida. Pada suhu yang lebih tinggi di bagian tengah kiln, kalsium oksida bereaksi dengan silika, alumina, dan oksida lainnya untuk membentuk mineral klinker. Kalsinasi terjadi pada suhu sekitar 900-1000°C, sementara pembakaran klinker terjadi pada suhu sekitar 1450-1500°C. Proses ini mengubah bahan mentah menjadi klinker yang keras (Kosmatka, S. H., & Kerkhoff, B., 2002).

c. Pengendalian dan Pemantauan

Selama seluruh proses, suhu, aliran bahan, dan komposisi kimia dipantau secara ketat menggunakan sistem kontrol otomatis untuk memastikan kualitas klinker dan efisiensi energi. Sistem kontrol ini membantu dalam mengatur parameter proses, seperti suhu kiln dan laju aliran bahan, serta memastikan bahwa proses berjalan dengan lancar dan efisien (Mollah, M. Y. A., & Mollah, M., 2018). Klinker yang telah didinginkan kemudian digiling bersama dengan gypsum dan bahan tambahan lainnya dalam *cement mill* untuk menghasilkan semen bubuk yang siap untuk digunakan. Penggilingan akhir ini memproduksi semen dengan karakteristik yang diinginkan untuk aplikasi konstruksi.

2.13 Uji Normalitas Shapiro Wilk

Uji normalitas dilakukan untuk mengevaluasi apakah setiap variabel memiliki distribusi yang mendekati normal atau tidak. Kualitas model regresi yang baik terbukti dengan nilai residual yang berdistribusi normal. Dalam penelitian ini, pengujian normalitas data dilakukan dengan menggunakan *probability plot*, yang membandingkan distribusi kumulatif dengan distribusi normal. Distribusi normal

ditunjukkan oleh garis diagonal, sementara data residual akan dibandingkan dengan garis diagonal. (Ghozali, 2016).

uji normalitas Shapiro – Wilk adalah uji yang dilakukan untuk mengetahui sebaran data acak suatu sampel yang kecil digunakan simulasi data yang tidak lebih dari 50 sampel. (Sugiyono, 2014; Agustin, 2020)

Metode Shapiro Wilk menggunakan data dasar yang belum diolah dalam tabel distribusi frekuensi. Data diurut, kemudian dibagi dalam dua kelompok untuk dikonversi dalam Shapiro Wilk. Dapat juga dilanjutkan transformasi dalam nilai Z untuk dapat dihitung luasan kurva normal.

a) Rumus uji Shapiro Wilk

$$T_3 = \frac{1}{D} \left[\sum_{i=1}^k a_i (X_{n-i+1} - X_1) \right]^2 \quad (2)$$

Keterangan:

D : Koefisien test Shapiro Wilk
 X_{n-i+1} : Angka ke $n - i + 1$ pada data
 X_i : Angka ke i pada data

$$D = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

Keterangan:

X_i : Angka ke i pada data yang
 $\bar{X}$: Rata-rata data

$$G = b_n + c_n + \ln \left(\frac{T_3 - d_n}{1 - T_3} \right) \quad (4)$$

Keterangan:

G : Identik dengan nilai Z distribusi normal
 T_3 : Berdasarkan rumus di atas b_n , c_n , d_n = Konversi Statistik Shapiro-Wilk Pendekatan Distribusi Normal

b) Syarat uji Shapiro Wilk

1. Data berskala interval
2. Data tunggal/belum dikelompokkan pada tabel distribusi frekuensi
3. Data dari sampel random

c) Hasil uji Shapiro Wilk

Cara baca hasil perhitungan uji shapiro wilk adalah dengan melihat nilai shapiro wilk hitung dan tingkat Signifikansinya. Dalam hasil uji SPSS, nilai shapiro hitung ditunjukkan dengan nilai VALUE, sedangkan signifikansinya ditunjukkan dengan nilai Sig

d) Signifikansi

Signifikansi dibandingkan dengan tabel Shapiro Wilk. Signifikansi uji nilai T3 dibandingkan dengan nilai tabel Shapiro W, untuk dilihat posisi nilai probabilitasnya (p).

Jika nilai $p > 5\%$, maka H_0 diterima ; H_a ditolak.

Jika nilai $p < 5\%$, maka H_0 ditolak ; H_a diterima.

2.14 Uji Korelasi Pearson

Teknik statistik yang kerap kali digunakan untuk mencari hubungan antara variabel untuk data numerik adalah teknik korelasi dengan Pearson atau dikenal dengan *Correlation Product Moment*. Korelasi Pearson *Product Moment*, merupakan pengukuran parametrik, akan menghasilkan Koefisien korelasi yang berfungsi untuk mengukur kekuatan hubungan linier antara dua variabel. Jika hubungan dua variabel tidak linier, maka Koefisien korelasi Pearson tersebut tidak mencerminkan kekuatan hubungan dua variabel yang sedang diteliti meski kedua variabel mempunyai hubungan kuat (Sarwono, 2012).

Analisis korelasi adalah teknik analisis yang digunakan untuk mengukur kuat lemahnya hubungan dua variabel. Variabel ini terdiri dari variabel bebas dan tergantung. Besarnya hubungan berkisar antara 0-1. Jika mendekati angka 1 berarti hubungan kedua variabel semakin kuat, demikian juga sebaliknya jika mendekati angka 0 berarti hubungan kedua variabel semakin lemah. Korelasi pearson digunakan untuk mengetahui ada tidaknya hubungan antara 2 variabel, yaitu variabel bebas dan variabel tergantung yang berskala interval atau rasio parametrik (Miharja, 2020).

Rumus korelasi Pearson:

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sqrt{(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n})(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n})}} \quad (5)$$

Keterangan:

r : nilai korelasi
x : variabel x
y : variabel y

Untuk membuat kesimpulan hubungan antara dua variabel, perlu memenuhi kriteria sebagai berikut, apabila:

- a. 0,00 - 0,199 : hubungan korelasinya sangat lemah
- b. 0,20 - 0,399 : hubungan korelasinya lemah
- c. 0,40 – 0,599 : hubungan korelasinya sedang
- d. 0,60 – 0,799 : hubungan korelasi kuat
- e. 0,80 – 1 : hubungan korelasinya sangat kuat