

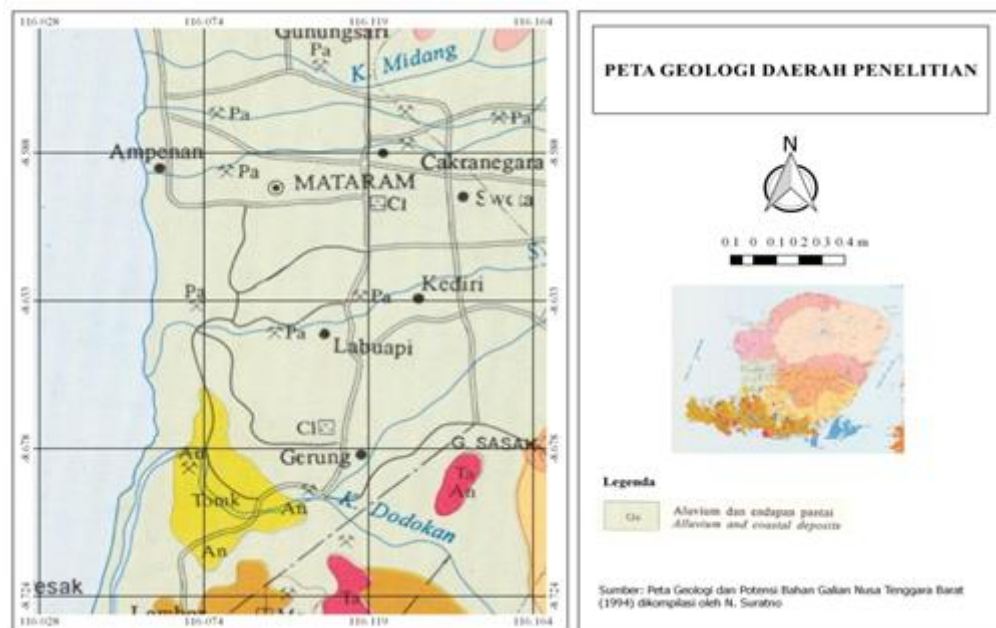
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan Peta Geologi Lombok, Nusa Tenggara Barat oleh Mangga *et al.*, pada tahun 1994, terdapat formasi-formasi yang tersusun di Pulau Lombok, antara lain :

- a. Formasi Aluvium (Qa) terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lempung, gambut dan pecahan koral;
- b. Formasi Kalibabak (TQb) yang terdiri dari breksi dan lava;
- c. Formasi Kalipalung (TQp) yang terdiri dari perselingan breksi gampingan dan lava;
- d. Formasi Pengulung (Tomp) yang terdiri dari breksi, lava, tuff dengan lensa batugamping yang mengandung mineral sulfida dan urat kuarsa;
- e. Formasi Kawangan (Tomk) yang terdiri dari perselingan batupasir kuarsa, batulempung dan breksi;
- f. Formasi Batuan Terobosan (Tmi) yang terdiri dari dasit dan basal.

Adapun untuk peta geologi daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.1. Berdasarkan peta tersebut, statigrafi TPA Kebon Kongok yang berada pada Desa Suka Makmur, Kecamatan Gerung, Kabupaten Lombok Barat, Provinsi Nusa Tenggara Barat tersusun atas formasi Qa. Formasi Qa merupakan formasi alluvium yang terdiri atas material kerakal, kerikil, pasir, pasir lempungan, gambut, dan pecahan koral. Tanah pada lokasi TPA berupa tanah cokelat muda dan berpasir halus dengan daya resapan air tinggi sehingga membuat daerah ini sangat rentan terhadap polusi yang diakibatkan oleh lindi karena permeabilitas tinggi terutama pada musim penghujan (Arjwech *et al.*, 2020).



Gambar 2.1 Peta geologi TPA Kebon Kongok

2.2 Tempat Pemrosesan Akhir

Tempat Pemrosesan Akhir merupakan tahap akhir proses perjalanan penanganan sampah yang dimulai sejak timbul di sumber, pewadahan, pengumpulan, pengangkutan hingga pembuangan. Menurut SNI 03-3241-1994, tempat pemrosesan akhir (TPA) sampah adalah sarana fisik untuk berlangsungnya kegiatan pembuangan akhir sampah berupa tempat yang digunakan untuk mengkarantina sampah kota secara aman. Sebelum ditetapkannya UU No. 18 tahun 2008, tempat pemrosesan akhir disebut tempat pembuangan akhir, yang dimana sekarang secara prinsip menjadi tempat pemrosesan akhir sampah yang kemudian didefinisikan sebagai pemrosesan akhir sampah dalam bentuk pengembalian sampah dan/atau residu ke lingkungan secara aman.

Secara garis besar ada 2 metode pengelolaan sampah yang sering digunakan, yaitu metode *open dumping* dan metode *sanitary landfill*. Metode *open dumping* adalah sistem pembuangan sampah yang dilakukan secara terbuka. Hal ini akan menjadi masalah jika sampah yang dihasilkan adalah sampah organik yang membusuk karena menimbulkan gangguan pembauan dan estetika serta menjadi sumber penularan penyakit. Metode selanjutnya

adalah metode *sanitary landfill* yang merupakan penimbunan sampah dengan cara mengurug sampah secara berlapis-lapis pada lahan yang telah disiapkan, diratakan dan dipadatkan, kemudian ditutup dengan tanah penutup setiap akhir operasi. Metode ini menguntungkan karena dapat menangani fluktuasi dalam pembentukan limbah, mengakomodasi berbagai jenis limbah, dan mengurangi masalah estetika lingkungan sambil mengelola lindi dan emisi gas secara efektif (Arinda et al., 2023).

Jika dibandingkan antara kedua metode itu maka metode *sanitary landfill* sangat jauh lebih baik daripada metode *open dumping*. *Sanitary landfill* didesain sedemikian rupa untuk mencegah merembesnya lindi ke dalam air tanah. Di dasar TPA, dipasang *clay liner* yaitu tanah lempung yang dipadatkan lapis demi lapis dengan energi dan kadar air tertentu. Di atas *clay liner*, dipasang *geomembrane* yang juga berfungsi mencegah merembesnya lindi ke dalam air tanah (Kenzo et al., 2020). Berdasarkan Permen PU No. 03/PRT/M/2013, penanganan sampah pada tahap pemrosesan akhir sampah dilakukan dengan menggunakan metode lahan urug terkendali, lahan urug saniter dan/atau teknologi ramah lingkungan yang dapat dilakukan melalui kegiatan penimbunan/pemadatan, penutupan tanah, pengolahan lindi dan penanganan gas. Selain itu pada pemrosesan akhir ini harus terdapat 4 aktivitas penanganan sampah di TPA, yaitu pemilahan sampah, daur ulang sampah nonorganik, pengomposan sampah organik dan pengurugan/penimbunan sampah residu dari proses-proses tersebut (Siddiqua et al., 2022).

Pemantauan lingkungan di sekitar TPA merupakan aspek penting dalam pengelolaan TPA. Pemantauan ini melibatkan pengukuran berkala kualitas air tanah, udara, dan stabilitas struktur TPA untuk memastikan bahwa tidak ada kebocoran atau pencemaran yang terjadi di sekitar TPA. Pemantauan yang konsisten dan tepat waktu memungkinkan pengelola TPA untuk segera mengambil tindakan korektif jika ditemukan adanya indikasi pencemaran. Hal ini sangat penting untuk menjaga kesehatan masyarakat sekitar dan kelestarian lingkungan. TPA menjadi tempat akhir dan bisa jadi menjadi komponen paling penting dalam proses panjang dan kompleks dari pengelolaan sampah suatu

daerah. Oleh karena itu mengenai pengambilan keputusan untuk penentuan lokasi TPA sampah menjadi sangat penting agar diperhatikan karena pengelolaan sampah yang tidak efektif akan berdampak negatif terhadap kehidupan sehari-hari masyarakat di sekitar TPA (Nurbojatmiko et al., 2019).

2.3 Pencemaran Tanah

Tanah merupakan komponen kunci dari ekosistem alami dan kelestarian lingkungan yang sebagian besar tergantung pada ekosistem tanah yang berkelanjutan. Tanah didefinisikan sebagai lapisan atas litosfer bumi yang terbentuk dari batuan yang telah diubah oleh organisme hidup. Tanah terdiri dari lima komponen utama, yaitu: mineral, air, udara tanah, bahan organik, dan organisme yang hidup di dalam tanah dimana komposisi kimia dan sifat fisik tanah merupakan habitat bagi sejumlah besar mikroorganisme dan organisme hidup lainnya (Ibe et al., 2014). Namun, akibat aktivitas antropogenik yang sangat tinggi seperti misalnya dari industri logam, kimia, pertambangan, dan penggunaan pupuk yang berlebihan mengakibatkan terjadinya pencemaran pada tanah.

Menurut Peraturan Pemerintah RI No. 150 tahun 2000 tentang Pengendalian Kerusakan Tanah Untuk Produksi Bio Massa disebutkan bahwa tanah adalah salah satu komponen lahan berupa lapisan teratas kerak bumi yang terdiri dari bahan mineral dan bahan organik serta mempunyai sifat fisik, kimia, biologi, yang dapat menunjang kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Namun, akibat kegiatan manusia yang mengeksploitasi sumber daya alam secara berlebihan menyebabkan banyak terjadi kerusakan pada tanah. Di dalam PP No. 150 tahun disebutkan bahwa kerusakan tanah untuk produksi biomassa adalah berubahnya sifat dasar tanah yang melampaui kriteria baku kerusakan tanah. Ketika suatu zat berbahaya/beracun telah mencemari permukaan tanah, maka ia dapat menguap, tersapu air hujan dan atau masuk ke dalam tanah. Pencemaran yang masuk ke dalam tanah kemudian terendap sebagai zat kimia beracun di tanah. Zat beracun di tanah tersebut dapat berdampak langsung kepada manusia ketika bersentuhan atau dapat mencemari air tanah dan udara di atasnya.

Pencemaran tanah merupakan masalah lingkungan yang signifikan yang muncul dari berbagai sumber, termasuk kegiatan industri, pengelolaan limbah yang tidak tepat, pertambangan, dan penggunaan produk minyak bumi. Kontaminasi ini menimbulkan risiko langsung dan tidak langsung bagi kesehatan manusia dan lingkungan, mempengaruhi kualitas tanah dan kemampuannya untuk mendukung ekosistem dan aktivitas manusia (Che Lat et al., 2023). Pembuangan limbah ke tanah apabila melebihi kemampuan tanah dalam mengolah limbah akan mengakibatkan pencemaran tanah. Jenis limbah yang potensial merusak lingkungan hidup adalah limbah yang termasuk dalam Bahan Beracun Berbahaya (B3) yang di dalamnya terdapat logam-logam berat.

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang tidak dikelola dengan baik juga menjadi sumber pencemaran tanah. Lindi (*leachate*) yang dihasilkan dari dekomposisi limbah organik di TPA dapat mengandung berbagai polutan berbahaya, termasuk logam berat, senyawa organik beracun, dan patogen. Jika lindi ini meresap ke dalam tanah tanpa pengolahan yang memadai, dapat mencemari lapisan tanah dan air tanah, menimbulkan risiko kesehatan bagi penduduk sekitar. Penggunaan sistem pengelolaan yang efektif seperti pelapisan geomembran dan pengolahan lindi sangat penting untuk mencegah pencemaran tanah dari TPA (Thomas et al., 2023).

2.4 Lindi

Lindi merupakan cairan limbah yang dihasilkan dari proses penguraian sampah dan mengalir di bawah tumpukan sampah. Lindi dapat menyerap zat-zat pencemar yang ada di sekitarnya sehingga di dalam lindi terdapat mikroba patogen, logam berat, atau zat berbahaya lainnya. Cairan lindi ini berasal dari proses pencampuran air hujan dengan tumpukan sampah, sehingga bahan-bahan terlarut dari sampah akan terekstraksi (Supriatna, 2021). Lindi dapat didefinisikan sebagai cairan yang timbul dari hasil dekomposisi biologis sampah yang telah membusuk yang mengalami pelarutan akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah. Air lindi akibat proses degradasi sampah dari TPA merupakan sumber yang mempengaruhi perubahan sifat fisik, kimia, maupun biologi (Anaperta et al., 2017).

Menurut Youcai (2018), kandungan yang terdapat pada lindi antara lain, polutan organik beracun, logam berat (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Hg), senyawa nitrogen amonia, ion anionik (Cl, Br, F, NO₃, HCO₃, SO₄²⁻), dan bahan organik beracun. Di dalam lindi juga terdapat bakteri patogen seperti *Staphylococcus spp.*, *Klebsiella aerogenes*, *Proteus spp.*, *Priestia megaterium*, *Pseudomonas stutzeri*, dan *Enterobacter hormaechei* yang berbahaya bagi manusia dan lingkungan (Daniel et al., 2023). Kandungan gas CH₄, NH₃, dan H₂S pada lindi merupakan sumber penyebab bau tak sedap pada tumpukan sampah di TPA. Unsur-unsur kimia dan patogen/bakteri dapat mengakibatkan pencemaran lingkungan baik itu pencemaran air, tanah, maupun udara, sehingga hal ini dapat menimbulkan penyakit pada manusia dan makhluk hidup lainnya.

Air lindi di bawah kondisi normal akan didapatkan di dasar pembuangan sampah sehingga penyebarannya melalui lapisan bawah. Karakteristik material penyusun area TPA juga mempengaruhi terjadinya penyebaran secara lateral atau vertikal. Banyak penelitian dititik beratkan pada rembesan dengan arah vertikal. Hal ini disebabkan karena rembesan dengan arah vertikal ini erat kaitannya dengan kontaminasi air tanah. Karakteristik air lindi sangat bervariasi, bergantung pada proses yang terjadi di TPA, meliputi proses fisik, kimiawi dan biologis. Faktor lain yang mempengaruhi proses degradasi sampah ialah jenis sampah, lokasi TPA, hidrogeologi dan sistem pengoperasian (Abrauw, 2019). Faktor-faktor tersebut juga tidak selalu sama antar tempat pembuangan yang satu dengan yang lainnya, begitu juga dengan aktivitas biologis terjadi pada timbunan sampah baik secara aerob maupun anaerob. Berbagai aktivitas tersebut akan mempengaruhi produk yang dihasilkan dari proses dekomposisi dan degradasi sampah meliputi kualitas dan kuantitas air lindi. Sebagai contoh bila suatu TPA menimbun banyak sampah organik maka karakter air lindi yang dihasilkan akan mengandung zat organik tinggi disertai dengan bau yang busuk. Adapun karakteristik dari lindi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik lindi

Parameter (Satuan)	Rentang Nilai	Baku Mutu
Suhu (°C)	25,8–30,2	38
Konduktivitas listrik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	30–163	–
TDS (mg/L)	400–2160	2000
pH	7,4–8,0	6–9
COD (mg/L)	135,1–387,2	300
BOD (mg/L)	63,8–187,2	150
Pb (mg/L)	0,3–1,6	0,1
Cu (mg/L)	0,4–1,1	2,0
Fe (mg/L)	0,6–2,9	5,0

Sumber : (Sari & Afdal, 2017)

2.5 Sifat Kelistrikan Batuan

Sifat kelistrikan batuan adalah karakteristik batuan untuk menghambat atau meneruskan arus listrik yang dialirkan ke dalamnya. Arus listrik ini dapat berasal dari alam itu sendiri maupun buatan dengan cara memasukkan arus listrik secara sengaja ke dalam permukaan bumi. Batuan memiliki atom-atom terikat secara ionik atau kovalen. Ikatan inilah yang menyebabkan batuan memiliki sifat menghantarkan arus listrik. Aliran arus listrik di dalam batuan dan mineral dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi secara elektronik, konduksi secara elektrolit, dan konduksi secara dielektrik, besarnya dipengaruhi oleh porositas batuan dan juga dipengaruhi oleh jumlah air yang terperangkap dalam pori-pori batuan. Telford et al., (1990) menyatakan bahwa aliran listrik dan mineral di dalam batuan dan mineral digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi secara elektronik, konduksi secara elektrolitik dan konduksi secara dielektrik.

a. Konduksi Elektronik

Konduksi ini adalah tipe normal dari aliran arus listrik dalam batuan/mineral. Hal ini terjadi jika batuan/mineral tersebut mempunyai banyak elektron bebas. Akibatnya, arus listrik mudah mengalir pada batuan

ini (contoh: batuan yang banyak mengandung logam). Konduksi elektronik dalam sifat listrik batuan merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh berbagai faktor dan mekanisme. Terutama, konduksi elektronik terjadi melalui pergerakan elektron di dalam matriks batuan, yang konduktivitasnya jauh lebih rendah dibandingkan dengan logam tetapi masih penting dalam semikonduktor dan mineral tertentu. Selain itu, konduktivitas listrik batuan dipengaruhi oleh porositas, permeabilitas batuan, konduktivitas cairan pori, dan ukuran butiran mineral. Fenomena polarisasi yang diinduksi, yang muncul dari reaksi kimia antara larutan elektrolitik di ruang pori dan mineral sulfida semikonduktor, juga berdampak pada konduksi elektronik (Zhdanov, 2018). Selain itu, konduksi elektronik memiliki sifat yang sensitif terhadap kondisi lingkungan seperti suhu dan tekanan yang memungkinkan pengukuran dapat dilakukan dari jarak yang jauh, sehingga menguntungkan untuk aplikasi seperti pemantauan aliran fluida di lingkungan bawah permukaan (Glover, 2015).

b. Konduksi Elektrolitik

Konduksi ini banyak terjadi pada batuan/mineral yang bersifat porus dan pada pori-pori tersebut terisi oleh larutan elektrolit. Dalam hal ini, arus listrik mengalir akibat dibawa oleh ion-ion larutan elektrolit. Ketergantungan konduktivitas listrik pada faktor-faktor seperti porositas, permeabilitas, dan konduktivitas cairan pori sangat penting sehingga peran sifat fluida pori dapat menentukan perilaku listrik keseluruhan batuan di bawah permukaan tanah (Roy, 2020).

c. Konduksi Dielektrik

Konduksi ini terjadi pada batuan yang bersifat dielektrik, artinya batuan tersebut mempunyai elektron bebas sedikit atau bahkan tidak ada sama sekali. Oleh karena adanya pengaruh medan listrik dari luar, elektron-elektron dalam atom batuan dipaksa berpindah dan berkumpul terpisah dengan intinya sehingga terjadi polarisasi. Peristiwa ini sangat bergantung pada konstanta dielektrik batuan yang bersangkutan. Sifat dielektrik, ditandai dengan permitivitas dielektrik yang mendominasi konduksi listrik

pada batuan dengan porositas dan permeabilitas rendah, seperti batu pasir yang rapat, yang di mana antar-pori-pori hampir tidak terhubung dan berada pada skala mikro atau nano, sehingga membuat konduksi ionik kurang efektif. Permittivitas dielektrik sangat sensitif terhadap faktor-faktor seperti saturasi air dan salinitas, terutama pada frekuensi rendah (J. H. Schön, 2015).

2.6 Resistivitas Batuan

Resistivitas batuan adalah sifat fisik mendasar yang mengukur kemampuan batuan untuk menahan aliran arus listrik. Hal ini banyak digunakan di berbagai bidang seperti eksplorasi sumber daya, teknik geoteknik, teknik lingkungan, dan mitigasi bencana. Resistivitas batuan dapat ditentukan melalui metode geofisika seperti *Electrical Resistivity Imaging* (ERI), *Magnetotellurics* (MT), dan *Audio-Magnetotellurics* (AMT) yang dilakukan di permukaan, dan divalidasi dengan pengukuran langsung pada sampel batuan menggunakan instrumen seperti *Real Time Rock Resistivity Meter* (Ramli et al., 2022). Berdasarkan harga resistivitas listriknya, batuan dan mineral dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu (Telford et al., 1990).

1. Konduktor baik : $10^{-8} \Omega\text{m} < \rho < 1 \Omega\text{m}$
2. Konduktor pertengahan : $1 \Omega\text{m} < \rho < 10^7 \Omega\text{m}$
3. Isolator : $\rho > 10^7 \Omega\text{m}$

Secara teoritis setiap batuan memiliki daya hantar listrik dan harga tahanan jenisnya masingmasing. Batuan yang sama belum tentu mempunyai nilai tahanan jenis yang sama. Adapun terkait nilai resistivitas batuan di bawah permukaan bumi dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai resistivitas batuan

Material	Resistivitas (Ωm)
Udara	~
Air asin	0,2
Air tanah	0,5–300
Lempung	1–100
Pasir	1–1.000
Batu pasir	$1-1 \times 10^8$
Aluvium	10–800
Kerikil	100–600
Andesit	$170-45 \times 10^4$
Basal	200–100.000
Gamping	500–10.000
Kwarsa	500–800.000
Kerikil kering	600–10.000

Sumber : (Telford et al., 1990)

Salah satu sifat fisika air yang biasa digunakan untuk menentukan polutan dalam air yaitu konduktivitas listrik. Dari sifat konduktivitas listrik pada polutan, maka kita dapat mengetahui jenis dari polutan tersebut yaitu dari harga resistivitas limbah. Karakteristik air lindi yang dilihat dari sifat fisisnya yaitu nilai resistivitas akan bernilai kurang dari 10 Ωm , sehingga hal ini yang akan membedakan dengan air bersih dengan resistivitas 10–100 Ωm . Secara keseluruhan, nilai resistivitas lindi yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi yang signifikan, dan variasi nilai ini dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis tanah, porositas, permeabilitas, dan kondisi geologis setempat (Zaini et al., 2022). Tabel 2.3 di bawah ini merupakan nilai resistivitas beberapa jenis limbah dari beberapa penelitian yang dirangkum oleh (Wulandari et al., 2015)

Tabel 2.3 Nilai resistivitas limbah

Jenis Limbah	Resistivitas (Ωm)
Sampah pada pasir	41,61–81
Sampah pada tanah	10,4–31,9
Sampah pada campuran	17,4–62,7
Akuifer tercemar	1,23–1,81
Polutan cair (oli) pada pasir	2,09–4,63
Pasir besi pada lempung	172–359
Lindi TPA Jatibarang	24,4–86,9
Polutan pada pasir	89,3–457
Air tanah tercemar	< 8

Sumber: (Wulandari et al., 2015)

2.7 Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik merupakan salah satu metode geofisika yang paling banyak digunakan untuk menduga kondisi di bawah permukaan dengan cara mengalirkan arus listrik ke dalam bumi melalui dua elektroda arus kemudian mengukur beda potensial menggunakan dua elektroda lain. Metode resistivitas merupakan metode yang bertujuan mempelajari variasi tahanan jenis lapisan bawah permukaan secara horizontal, pada metode ini dipergunakan konfigurasi elektroda yang sama untuk semua titik pengamatan di permukaan bumi dan dibuat kontur isoresistivitasnya (Loke, 2004). Prinsip dasar yang digunakan dalam metode geolistrik resistivitas adalah Hukum Ohm yang pertama kali dicetuskan oleh George Simon Ohm (1787-1854). George Simon Ohm menyatakan bahwa kuat arus yang mengalir dalam suatu medium memiliki nilai yang sebanding dengan beda potensial di antara ujung-ujung medium tersebut. Dalam teori tersebut juga dijelaskan bahwa resistivitas yang diukur berbanding lurus dengan panjang medium dan berbanding terbalik dengan luas penampang medium. Hubungan antara hambatan, arus, dan beda

potensial mengikuti Hukum Ohm dinyatakan dalam persamaan berikut (Santosan & Adji, 2018).

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

dari persamaan 2.1 dan 2.2, dapat ditentukan nilai V yaitu :

$$V = IR \quad (2.3)$$

$$V = I \rho \frac{L}{A} \quad (2.4)$$

$$\frac{V}{L} = \rho \frac{I}{A} \quad (2.5)$$

$$\frac{V}{L} = \rho J \quad (2.6)$$

$$J = \frac{1}{\rho} \frac{V}{L} \quad (2.7)$$

$$J = \sigma E \quad (2.8)$$

dengan I adalah arus, V adalah beda potensial, R adalah hambatan, L adalah panjang medium, A adalah luas penampang medium, dan J adalah rapat arus.

Adapun untuk arus listrik dengan sumber tunggal yang dialirkan ke bawah permukaan bumi, arah aliran arus listriknya adalah menyebar ke segala arah dalam suatu ruang berbentuk setengah bola (Gambar 2.2), sehingga luas permukaannya bernilai $A=2\pi r^2$. Beda potensial (δV) pada kulit bola tersebut untuk lapisan setebal (δr) adalah (Reynolds, 2011).

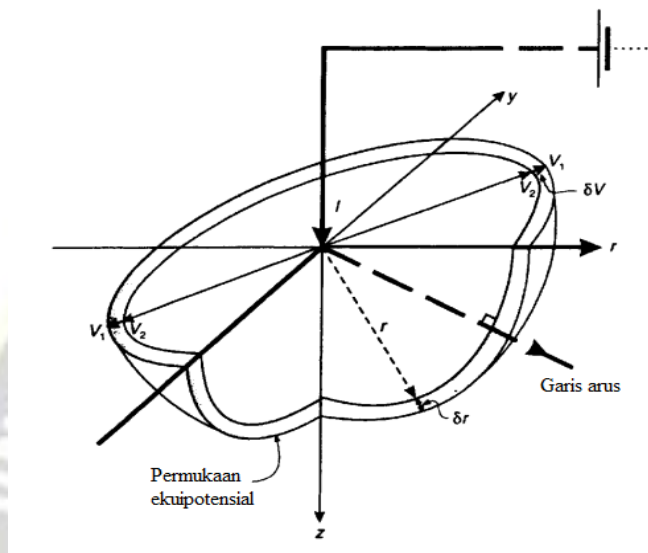
$$\frac{\delta V}{\delta r} = \rho J \quad (2.9)$$

$$\frac{\delta V}{\delta r} = \rho \frac{I}{A} \quad (2.10)$$

$$\frac{\delta V}{\delta r} = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.11)$$

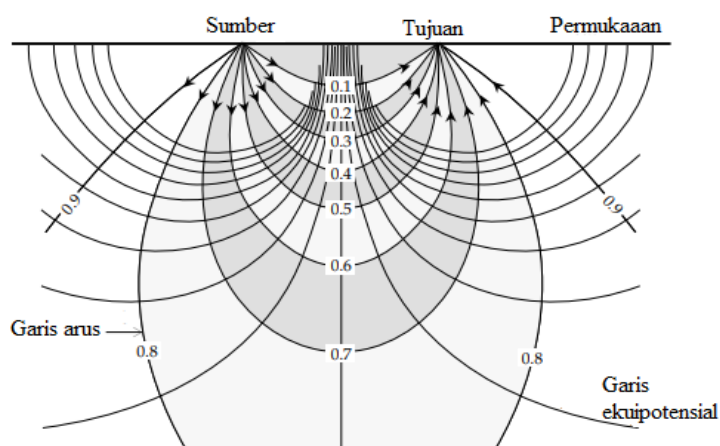
Dintegrasikan persamaan sebelumnya, untuk mendapatkan nilai beda potensial dari satu titik arus menjadi :

$$V_r = \int \delta V = \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} \delta r = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (2.12)$$



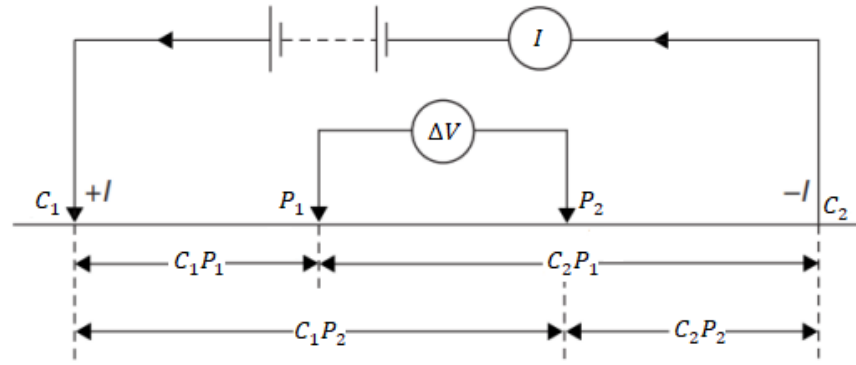
Gambar 2.2 Arah aliran arus listrik dan medan ekuipotensial pada bentuk setengah bola (Reynolds, 2011)

Apabila terdapat dua sumber arus listrik dengan arah arus listrik dari S_1 menuju S_2 , maka medan ekuipotensialnya terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Garis arus listrik dan medan ekuipotensial yang timbul karena adanya dua sumber arus (Lowrie & Fichtner, 2020)

Kasus dua sumber arus listrik ini digunakan dalam pengukuran lapangan dengan menggunakan dua elektroda arus (C_1 dan C_2) dan dua elektroda potensial (P_1 dan P_2). Gambar 2.4 merupakan bentuk kasus dua sumber arus listrik dalam medium homogen.



Gambar 2.4 Pasangan elektroda arus dan potensial (Reynolds, 2011)

Bila jarak antara elektroda $C_1 - P_1 - P_2 - C_2$ sudah ditentukan, maka beda potensial yang timbul antara $C_1 P_1$, $C_2 P_1$, $C_1 P_2$, dan $C_2 P_2$ adalah

$$V_{C_1P_1} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{C_1P_1}} \quad (2.13)$$

$$V_{C_2P_1} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{C_2P_1}} \quad (2.14)$$

$$V_{C_1P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{C_1P_2}} \quad (2.15)$$

$$V_{C_2P_2} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{C_2P_2}} \quad (2.16)$$

perhatikan nilai $+I$ dan $-I$. Dari persamaan 2.13 hingga 2.16, didapatkan persamaan baru, yaitu :

$$V_{P_1} = V_{C_1P_1} + V_{C_2P_1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} \right) \quad (2.17)$$

$$V_{P_2} = V_{C_1P_2} + V_{C_2P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1P_2}} - \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right) \quad (2.18)$$

Dari V_{P_1} dan V_{P_2} dapat dihitung, sehingga

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} \quad (2.19)$$

menjadi,

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} \right] - \left[\frac{1}{r_{C_1 P_2}} - \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right] \right\} \quad (2.20)$$

$$\rho = 2\pi \left\{ \left[\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} \right] - \left[\frac{1}{r_{C_1 P_2}} - \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right] \right\}^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad (2.21)$$

$$\rho = 2\pi \left\{ \left[\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} \right] - \left[\frac{1}{r_{C_1 P_2}} - \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right] \right\}^{-1} R \quad (2.22)$$

Sehingga, didapatkan persamaan

$$\rho = KR \quad (2.23)$$

yang dimana persamaan yang terletak di dalam kotak merah diasumsikan sebagai suatu nilai K. Nilai K adalah faktor geometrik (koreksi) secara umum yang merupakan besaran koreksi letak kedua elektroda potensial terhadap letak kedua elektroda arus (Reynolds, 2011).

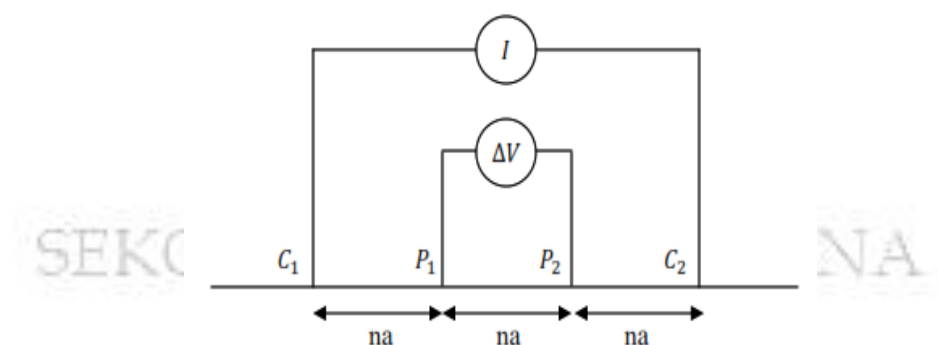
Berdasarkan tujuan pengukuran di lapangan, metode geolistrik tahanan jenis dibagi menjadi dua, yaitu *Vertical Electrical Sounding* (VES) dan *Lateral Profiling/Electrical Resistivity Tomography* (ERT). *Vertical Electrical Sounding* (VES) merupakan metode geolistrik yang bertujuan untuk menentukan kedalaman berdasarkan variasi resistivitas di bawah permukaan bumi secara vertikal. Pengukuran ini dilakukan dengan cara jarak elektroda arus dan tegangan diubah atau divariasikan pada titik ukur yang tetap, sehingga spasi elektroda (arus dan potensial) diperbesar secara bertahap sesuai dengan konfigurasi elektroda yang digunakan. Semakin panjang bentangan jarak elektrodanya, maka semakin dalam pula batuan yang dapat dideteksi, walaupun masih dalam batas-batas tertentu. Konfigurasi elektroda yang biasa dipakai adalah konfigurasi Schlumberger (Santoso, 2002).

Electrical Resistivity Tomography (ERT) merupakan metode yang bertujuan menentukan sebaran berdasarkan variasi resistivitas di bawah permukaan bumi secara vertikal dan horizontal (dua dimensi atau dapat pula

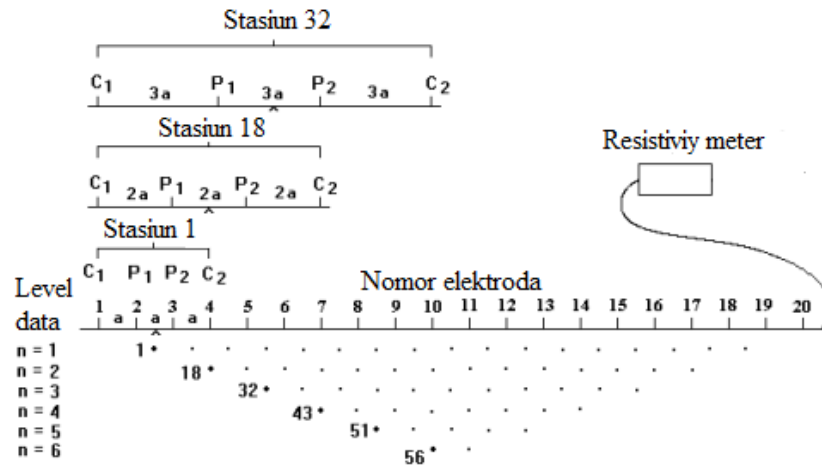
tiga dimensi). Pengukurannya dilakukan dengan cara memasang elektroda arus dan potensial pada satu garis lurus dengan spasi tertentu, kemudian semua elektroda dipindahkan atau digeser sepanjang lintasan sesuai dengan arah yang ditentukan sebelumnya. Konfigurasi elektroda yang sering dipakai adalah konfigurasi Wenner dan dipole-dipole (Telford et al., 1990).

2.8 Konfigurasi Wenner 2D

Metode geolistrik resistivitas berdasarkan konfigurasi elektrodanya dibagi menjadi beberapa macam yaitu konfigurasi Wenner, Schlumberger, pole-pole, pole-dipole dan dipole-dipole. Setiap konfigurasi mempunyai cara dan perhitungan yang berbeda untuk menentukan nilai resistivitas batuan di bawah permukaan. Konfigurasi Wenner merupakan salah satu konfigurasi yang sering digunakan dalam eksplorasi geolistrik dengan susunan jarak spasi sama panjang. Jarak antara elektroda arus (C_1 dan C_2) adalah tiga kali jarak elektroda potensial, jarak potensial dengan titik sounding-nya adalah $a/2$, maka jarak masing-masing elektroda arus dengan titik sounding-nya adalah $3a/2$. Target kedalaman yang mampu dicapai pada metode ini adalah $a/2$. Jarak antara elektroda arus dan elektroda potensial pada Konfigurasi Wenner adalah sama ($C_1 P_1 = C_2 P_2 = na$ dan jarak $C_1 P_2 = C_2 P_1 = 2na$) seperti yang terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Elektroda arus dan potensial pada konfigurasi Wenner



Gambar 2.6 *Stacking chart* pada konfigurasi Wenner (Loke, 2004)

Pada Gambar 2.6 menjelaskan tentang letak *datum point* pada konfigurasi Wenner 2D. Faktor geometrik (koreksi) untuk konfigurasi Wenner dapat dicari menggunakan persamaan K yang terdapat pada persamaan 2.22. sehingga didapatkan :

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} \right] - \left[\frac{1}{r_{C_1 P_2}} - \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right]} \quad (2.24)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} - \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}}} \quad (2.25)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{na} - \frac{1}{2na} - \frac{1}{2na} + \frac{1}{na}} \quad (2.26)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{2}{na} - \frac{2}{2na}} \quad (2.27)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{2}{na} - \frac{1}{na}} \quad (2.28)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{na}} \quad (2.29)$$

$$K = 2\pi na \quad (2.30)$$

Setelah didapatkan nilai K untuk konfigurasi Wenner, dapat ditentukan nilai resistivitas semunya dengan memasukkan K pada persamaan 2.23 sehingga didapatkan :

$$\rho_a = KR \quad (2.31)$$

$$\rho_a = 2\pi naR \quad (2.32)$$

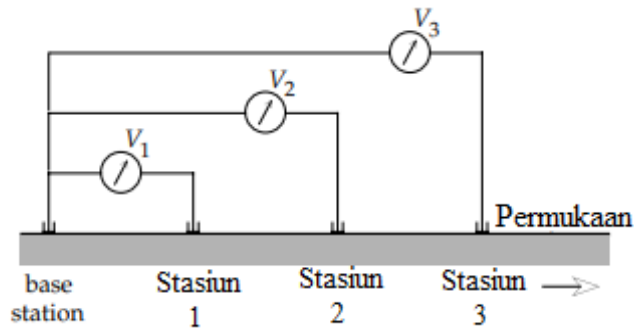
$$\rho_a = 2\pi na \frac{\Delta V}{I} \quad (2.33)$$

2.9 Metode *Self Potential*

Metode *self-potential* (SP) dikemukakan pada tahun 1830 oleh Robert Fox menggunakan elektroda lempeng tembaga yang dihubungkan dengan Galvanometer untuk mendeteksi cadangan sulfida tembaga di Corn Well, Inggris. Metode ini digunakan sejak tahun 1920 sebagai alternatif pada eksplorasi logam terutama bijih besi dalam jumlah besar. Metode ini juga secara luas digunakan untuk investigasi bawah permukaan air dan panas bumi, serta untuk tujuan pemetaan sebaran aliran lindi pada suatu wilayah TPA (Reynolds, 2011). Metode *self-potential* (SP) adalah teknik geofisika yang digunakan untuk mengidentifikasi dan memetakan distribusi lindi di daerah TPA dengan mengukur perbedaan potensial listrik alami di tanah tanpa menyuntikkan arus eksternal. Metode ini sangat efektif dalam mendeteksi zona akumulasi dan aliran lindi karena reaksi elektrokimia yang terjadi selama dekomposisi limbah (Muliadi et al., 2023).

Metode *self-potential* merupakan metode yang sederhana dan inovatif yang memungkinkan penilaian non-intrusif dan pencitraan gangguan pada arus listrik bawah permukaan konduktif dengan mengukur respons listrik di permukaan tanah atau di lubang bor. Metode ini merupakan salah satu metode geofisika pasif. Metode ini sering diaplikasikan pada pemetaan aliran fluida di bawah permukaan bumi (Revil & Jardani, 2013). Jenis konfigurasi yang digunakan pada penelitian SP, antara lain *leap-frog* dan *fixed base*. Konfigurasi *fixed base* menggunakan *porouspot* yang diletakkan di luar area pengukuran (*base*) dan satu *porouspot* yang lain bergerak di sepanjang titik pengukuran yang telah ditentukan (*rover*). Beda potensial yang terbaca pada multimeter adalah beda potensial antara elektroda *rover* dan *base*. Kelebihan metode ini adalah nilai kesalahannya (*error*) kecil karena pengukuran dilakukan secara

kontinyu, sedangkan kekurangannya adalah membutuhkan kabel yang sangat panjang dan waktu pengukurannya lebih lama dikarenakan harus terus menarik kabel serta menunggu nilai tegangan hingga stabil (Lowrie & Fichtner, 2020).



Gambar 2.7 Konfigurasi *fixed base* (Lowrie & Fichtner, 2020)

Data hasil pengukuran nilai beda potensial di lapangan belum menunjukkan potensial diri dari titik yang diambil nilai potensialnya, sehingga perlu dilakukan koreksi-koreksi berikut, antara lain (Nuha et al., 2018):

a. Variasi harian base

Variasi harian base merupakan selisih antara rata-rata nilai beda potensial yang terukur pada *base* (elektroda tetap) data ke-*n* dengan rata-rata nilai beda potensial awal pengukuran pada base. Adapun persamaan yang digunakan adalah :

$$VH = \Delta V_{\text{data ke-}n} - \Delta V_{\text{awal}} \quad (2.34)$$

dengan VH merupakan variasi harian *base*. Selanjutnya, dapat dicari nilai koreksi harian *base* (KHB) dengan cara menyamakan nilai VH pada waktu yang sama dengan pengukuran data *rover*.

b. Koreksi harian

Koreksi harian merupakan selisih antara rata-rata beda potensial pada waktu tertentu (*rover*) dengan koreksi harian pada base. Berikut persamaan koreksi harian :

$$KH = \Delta V_{\text{rover}} - KHB \quad (2.35)$$

c. Koreksi klosur

Koreksi klosur bertujuan untuk mengidentifikasi dan menghilangkan kesalahan sistematis yang mungkin terjadi selama pengukuran SP, seperti pergeseran potensial yang disebabkan oleh alat atau perubahan kondisi lingkungan. Adapun persamaan yang digunakan adalah

$$KK = KH - \left(\frac{KH_T - KH}{N} \right) n \quad (2.36)$$

dengan KK merupakan koreksi klosur, KH_T merupakan koreksi harian dari data terakhir, N merupakan jumlah data pengukuran di lapangan, dan n merupakan nomor urut pengambilan data di lapangan.

2.10 Pemetaan Dengan Aplikasi Surfer

Pemetaan adalah suatu proses penyajian informasi muka bumi baik bentuk permukaan buminya maupun sumbu alamnya, berdasarkan skala peta, sistem proyeksi peta, serta simbol-simbol dari unsur muka bumi yang disajikan. Langkah awal pemetaan yang dilakukan yaitu pengumpulan data, pengolahan data dan penyajian dalam bentuk peta. Pemetaan memungkinkan visualisasi spasial dari data yang kompleks, sehingga dapat membantu dalam memahami distribusi dan intensitas berbagai fenomena lingkungan, termasuk kontaminasi tanah dan air (Andersen et al., 2022). Dalam konteks penelitian pencemaran, pemetaan membantu mengidentifikasi area yang terkontaminasi, sumber pencemaran, dan pola penyebaran kontaminan. Teknologi pemetaan modern seperti GIS (*Geographic Information System*) dan disandingkan dengan metode geofisika seperti geolistrik telah meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam pengumpulan dan analisis data.

Kombinasi antara GIS dan metode geolistrik menawarkan pendekatan yang komprehensif untuk pemetaan kontaminasi. GIS menyediakan platform untuk integrasi dan analisis data spasial, sementara metode geolistrik memberikan informasi detail tentang kondisi bawah permukaan. Dengan menggabungkan kedua teknologi ini akan diperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang distribusi dan sifat kontaminan, serta memahami interaksi antara faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi penyebaran kontaminan

(Saha et al., 2022). Salah satu aplikasi yang dapat digunakan untuk melakukan pemetaan terkait penyebaran kontaminan adalah Surfer.

Surfer adalah suatu program pemetaan yang dapat dengan mudah melakukan interpolasi data hasil survey untuk membentuk kontur serta bentuk pemodelan tiga dimensinya sesuai dengan gridnya. Plotting data yang dilakukan oleh perangkat lunak ini yaitu berupa X,Y,Z (Budiyanto, 2005). Penelitian yang dilakukan Yamusa et al., (2019) terkait penggunaan aplikasi Surfer untuk menghasilkan plot kontur 2D dari gambar digital yang diubah menjadi format intensitas *Hue-Saturation-Intensity* (HSI). Plot kontur ini membantu memvisualisasikan migrasi sebaran dalam lapisan tanah laterit yang dipadatkan. Aplikasi Surfer memfasilitasi pemetaan penyebaran lindi dengan memberikan representasi grafis tentang bagaimana lindi bergerak melalui gradasi tanah yang berbeda dari waktu ke waktu. Adapun penelitian yang dilakukan oleh Oloche et al., (2023) di Nigeria didapatkan bahwa penggunaan aplikasi Surfer berperan penting dalam memvisualisasikan luas dan kedalaman zona sebaran lindi di sekitar tempat pembuangan sampah.

2.11 Analisis SWOT

Analisis SWOT merupakan teknik perencanaan dalam perancangan strategis dan pengembangan kebijakan yang digunakan untuk menilai kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman suatu kegiatan. Keempat unsur tersebut membentuk akronim SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) (Ngurah et al., 2018). Lebih lanjut menurut Salim dan Siswanto, (2019), analisis SWOT merupakan analisis kekuatan dan kelemahan yang dilakukan melalui tinjauan terhadap kondisi internal suatu strategi dan analisis terhadap peluang dan ancaman yang dihadapi oleh strategi tersebut melalui peninjauan terhadap kondisi eksternal.

Komponen-komponen dalam SWOT dijelaskan sebagai berikut (Salim & Siswanto, 2019):

1. Faktor Internal (*Internal Factors Analysis Summary* / IFAS)

- a. Kekuatan (S) merupakan kemampuan dan potensi dalam sebuah kegiatan sehingga dapat digunakan untuk membantu dalam pengembangan kebijakan.
 - b. Kelemahan (W) merupakan keterbatasan dalam sebuah kegiatan sehingga dapat menghambat potensi yang dimiliki dalam upaya pengembangan kebijakan di sektor tersebut.
2. Faktor Eksternal (*External Factors Analysis Summary* / EFAS)
- a. Peluang (O) adalah kesempatan di masa depan yang dapat digunakan bagi optimasi kemampuan dalam sebuah kegiatan.
 - b. Ancaman (T) adalah hambatan yang mengganggu terlaksananya sebuah kegiatan.

Tabel 2.4 Matriks hubungan antar faktor dalam analisis SWOT

IFAS EFAS	Kekuatan (S)	Kelemahan (W)
	Peluang (O)	Ancaman (T)
	SO kekuatan digunakan untuk memanfaatkan peluang (strategi agresif)	WO kelemahan diatasi dengan memanfaatkan peluang (strategi <i>turn-around</i>)
	ST kekuatan digunakan untuk mengatasi ancaman (strategi diversifikasi)	WT yaitu strategi mengatasi kelemahan dengan meminimalisir ancaman yang ada (strategi defensif)

Sumber: (Ngurah et al., 2018)

Terdapat beberapa strategi yang berada di dalam matriks SWOT. Setiap strategi memperlihatkan ciri yang berbeda, sehingga diperlukan perlakuan yang berbeda pula dalam penggunaannya. Adapun strategi yang dimasuk sebagai berikut (Salim & Siswanto, 2019):

1. Strategi agresif (Strategi SO, positif-positif)

Strategi ini menunjukkan bahwa topik yang sedang diteliti merupakan topik yang memiliki peluang dan kekuatan. Hasil atau rekomendasi strategi SO

adalah bersifat progresif yang artinya topik yang sedang diteliti dalam kondisi stabil sehingga sangat dimungkinkan untuk bertahan dan terus berkembang melakukan pembangunan hingga maksimal.

2. Strategi diversifikasi (Strategi ST, positif-negatif)

Strategi ini menunjukkan bahwa topik yang sedang diteliti merupakan topik yang kuat, namun juga menghadapi tantangan sehingga berpotensi rawan jatuh atau menimbulkan permasalahan baru. Hasil atau rekomendasi strategi ST adalah bersifat diversifikasi strategi yang artinya topik yang sedang diteliti dalam kondisi stabil namun menghadapi tantangan sehingga pembangunan tidak dapat berkembang apabila tetap mengacu pada strategi terdahulu. Oleh karena ini, pada kuadran ini diperlukan ragam strategi sehingga dapat menyelesaikan permasalahan yang ada. Strategi yang harus diterapkan adalah menggunakan kekuatan untuk memanfaatkan peluang.

3. Strategi *turn-around* (Strategi WO, negatif-positif)

Strategi ini menunjukkan bahwa topik yang sedang diteliti menunjukkan gejala tidak stabil namun sangat berpeluang, sehingga rekomendasi untuk strategi WO adalah Ubah Strategi. Artinya strategi yang sedang dijalankan saat ini harus segera dirubah sebab strategi yang lama dikhawatirkan sulit untuk menangkap peluang yang ada.

4. Strategi defensif (Strategi WT, negatif-negatif)

Strategi ini menunjukkan bahwa topik yang sedang diteliti menunjukkan gejala tidak stabil dan sedang menghadapi tantangan yang besar atau dalam istilah organisasi dinilai sebagai organisasi yang mati atau tidak berkembang. Hasil atau rekomendasi strategi WT adalah Strategi Bertahan yang artinya poin negatif dari faktor internal dari topik yang diteliti dan juga faktor eksternal harus dibenahi tanpa merubah strategi yang terdahulu, sehingga diharapkan adanya upaya pengembangan terutama dari faktor internal terlebih dahulu.

Analisis SWOT melibatkan penggunaan indikator-indikator yang berperan sebagai dasar penilaian untuk mengidentifikasi IFAS dan EFAS dalam pengelolaan TPA. Indikator-indikator ini dipilih dengan memperhatikan

prinsip-prinsip pengendalian pencemaran serta faktor-faktor yang memengaruhi tingkat pencemaran di sekitar TPA. Dalam analisis ini, faktor-faktor yang dijadikan acuan mencakup aspek kelembagaan TPA, aspek teknis bidang persampahan, aspek pengangkutan sampah ke TPA, aspek pembiayaan, aspek timbulan sampah, upaya pengendalian pencemaran, sikap dan perilaku masyarakat, serta peran pemerintah dalam upaya pengendalian pencemaran dalam pengelolaan TPA (Winahyu et al., 2019).



SEKOLAH PASCASARJANA