

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Air Tanah**

##### **1. Pengertian Air Tanah**

Air tanah merupakan air yang terdapat di bawah permukaan tanah, mengisi pori-pori batuan dan rongga antar butir tanah dalam zona jenuh. Proses pembentukannya berasal dari infiltrasi air hujan atau air permukaan yang meresap dan tertahan di lapisan geologi tertentu. Menurut Wahyuni & Abdurrahman (2020), air tanah merupakan bagian dari siklus hidrologi yang memiliki peran penting dalam penyediaan air bersih, terutama di daerah yang tidak memiliki akses air permukaan. Keberadaan air tanah sangat bergantung pada curah hujan, jenis tanah, dan kondisi geologi lokal.

Air tanah memiliki peran penting sebagai sumber air domestik dan irigasi pertanian. Menurut Wahyuningsih *et al.* (2021) di wilayah pedesaan dan pertanian, air tanah menjadi sumber utama air minum karena ketersediaannya yang relatif stabil dan mudah dijangkau. Namun, keberlanjutan pemanfaatan air tanah harus mempertimbangkan keseimbangan antara pengambilan dan pengisian ulang (recharge). Apabila eksploitasi berlebihan terjadi, dapat menimbulkan dampak negatif seperti penurunan muka air tanah, intrusi air laut, dan degradasi kualitas air.

Air tanah juga merupakan komponen penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Ia berkontribusi dalam mempertahankan kelembaban tanah, aliran sungai saat musim kering, dan stabilitas vegetasi. Wahyuni & Abdurrahman (2020) menekankan bahwa perubahan penggunaan lahan, deforestasi, serta pembangunan tanpa tata ruang yang terencana dapat menurunkan kapasitas tanah dalam menyimpan air. Pengelolaan daerah tangkapan air (*catchment area*) menjadi kunci untuk menjamin keberlanjutan sumber air tanah. Integrasi aspek hidrologi, geologi, dan perencanaan wilayah menjadi pendekatan ideal untuk menjaga kelestarian air tanah.

## 2. Jenis Air Tanah

Air tanah dangkal adalah jenis yang paling banyak dimanfaatkan oleh masyarakat pedesaan karena kemudahan akses dan biaya pembuatan sumur yang rendah. Namun, karena letaknya yang dekat dengan permukaan, air ini sangat rentan terhadap kontaminasi dari aktivitas manusia seperti limbah domestik, limbah pertanian, dan industri. Wahyuni & Abdurrahman (2020) menyebutkan bahwa sebagian besar sumur gali yang mengambil air tanah dangkal menunjukkan indikasi kontaminasi jika tidak dilengkapi konstruksi pelindung seperti lantai kedap air atau pelapis sumur.

Air tanah dalam adalah jenis air yang terperangkap dalam akuifer bertekanan di antara dua lapisan kedap air. Posisi ini membuat air tanah tersebut sering kali berada dalam tekanan yang cukup tinggi sehingga

dapat mengalir ke permukaan tanpa perlu dipompa, jika dibor dengan benar. Karena letaknya jauh dari permukaan, air tanah dalam lebih terlindungi dari kontaminasi limbah domestik maupun pertanian. Namun, eksplorasi air tanah dalam membutuhkan biaya tinggi dan teknologi pengeboran khusus. Karakteristik tersebut membuat air tanah dalam sangat cocok untuk pasokan air bersih di daerah urban yang padat dan memiliki risiko pencemaran permukaan tinggi (Rizal & Jember, 2023).

### 3. Standar Baku Mutu Kualitas Air Tanah

Standar baku mutu kualitas air tanah di Indonesia diatur dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023. Regulasi ini menggantikan Permenkes No. 492 Tahun 2010 dan menetapkan batasan maksimum kontaminan fisik, kimia, biologi, dan radioaktif dalam air yang digunakan untuk keperluan konsumsi dan sanitasi. Untuk parameter kimia, batas maksimal kandungan nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) dalam air bersih adalah 20 mg/L, sedangkan batas untuk nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) adalah 3 mg/L. Parameter lain seperti pH, kekeruhan, kandungan logam berat (Fe, Mn, Pb, Cd), dan mikroorganisme patogen juga memiliki batas masing-masing (Kementerian Kesehatan, 2023).

Tabel 2.1 Standar Baku Mutu Air Minum

No.	Jenis Parameter	Kadar Maksimum	Satuan	Metode Pengujian
<b>Mikrobiologi</b>				
1.	<i>Escherichia coli</i>	0	CFU/100ml	SNI / APHA
2.	<i>Total Coliform</i>	0	CFU/100ml	SNI / APHA
<b>Fisik</b>				
1.	Suhu	Suhu udara $\pm 3$	$^{\circ}\text{C}$	SNI / APHA
2.	<i>Total Dissolve Solid</i>	<300	mg/L	SNI / APHA
3.	Kekeruhan	<3	NTU	SNI atau yang setara
4.	Warna	10	TCU	SNI / APHA
5.	Bau	Tidak Berbau	-	SNI / APHA
<b>Kimia</b>				
1.	pH	6,5 – 8,5	-	SNI / APHA
2..	<b>Nitrat (sebagai <math>\text{NO}^3</math>) (terlarut)</b>	<b>20</b>	mg/L	SNI / APHA
3.	Nitrit (sebagai $\text{NO}^2$ ) (terlarut)	3	mg/L	SNI / APHA
4.	Kromium valensi 6 ( $\text{Cr}^{6+}$ ) (terlarut)	0,01	mg/L	SNI / APHA
5.	Besi (Fe) (terlarut)	0,2	mg/L	SNI / APHA
6.	Mangan (Mn) (terlarut)	0,1	mg/L	SNI / APHA
7.	Sisa Khlor (terlarut)	0,2 – 0,5 dengan waktu kontak 30 menit	mg/L	SNI / APHA
8.	Arsen (As) (terlarut)	0,01	mg/L	SNI / APHA
9.	Kadmium (Cd) (terlarut)	0,003	mg/L	SNI / APHA
10.	Timbal (Pb) (terlarut)	0,01	mg/L	SNI / APHA
11.	<i>Flouride</i> (F) (terlarut)	1,5	mg/L	SNI / APHA
12.	Alumunium (Al) (terlarut)	0,2	mg/L	SNI / APHA

Sumber: Kementerian Kesehatan (2023)

Tabel 2.2 Standar Baku Mutu Air Untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi

No.	Jenis Parameter	Kadar Maksimum	Satuan	Metode Pengujian
<b>Mikrobiologi</b>				
1.	<i>Escherichia coli</i>	0	CFU/100ml	SNI / APHA
2.	<i>Total Coliform</i>	0	CFU/100ml	SNI / APHA
<b>Fisik</b>				
1.	Suhu	Suhu udara $\pm$ 3	°C	SNI / APHA
2.	<i>Total Dissolve Solid</i>	<300	mg/L	SNI / APHA
3.	Kekeruhan	<3	NTU	SNI atau yang setara
4.	Warna	10	TCU	SNI / APHA
5.	Bau	Tidak Berbau	-	SNI / APHA
<b>Kimia</b>				
1.	pH	6,5 – 8,5	-	SNI / APHA
2..	<b>Nitrat (sebagai NO<sup>3</sup>) (terlarut)</b>	<b>20</b>	mg/L	SNI / APHA
3.	Nitrit (sebagai NO <sup>2</sup> ) (terlarut)	3	mg/L	SNI / APHA
4.	Kromium valensi 6 (Cr <sup>6+</sup> ) (terlarut)	0,01	mg/L	SNI / APHA
5.	Besi (Fe) (terlarut)	0,2	mg/L	SNI / APHA
6.	Mangan (Mn) (terlarut)	0,1	mg/L	SNI / APHA

Sumber: Kementerian Kesehatan (2023)

Selain sebagai acuan penilaian kualitas air, standar baku mutu juga berperan dalam perencanaan pembangunan sumur, penentuan lokasi, dan evaluasi risiko kesehatan. Misalnya, parameter mikrobiologis seperti total coliform dan *E. coli* sering menjadi indikator pencemaran limbah domestik. Menurut Permenkes, keberadaan mikroorganisme ini dalam air menunjukkan bahwa air tidak layak untuk dikonsumsi tanpa pengolahan. Oleh karena itu, pemenuhan seluruh parameter wajib sangat penting sebelum air dinyatakan aman untuk digunakan masyarakat.

Kesesuaian terhadap baku mutu juga berdampak langsung pada perizinan penggunaan sumber air oleh lembaga pemerintah atau swasta. Air tanah yang akan digunakan secara massal, seperti untuk air minum isi ulang atau PDAM, wajib memenuhi parameter dalam Permenkes. Jika ditemukan pelanggaran, maka penggunaan sumber air tersebut dapat dihentikan atau memerlukan pengolahan tambahan.

## **B. Sumur Gali**

### **1. Pengertian Sumur Gali**

Salah satu bentuk prasarana air bersih yang umum digunakan di wilayah dengan air tanah dangkal dan kualitas yang memadai adalah dengan sumur gali (SGL). Sumur gali adalah struktur bangunan yang dibuat secara vertikal hingga mencapai lapisan akuifer dangkal yang mengandung air tanah dengan tujuan untuk menyadap, menampung, dan memanfaatkan air tanah sebagai sumber air bersih. Sarana ini menjadi alternatif utama di daerah yang belum terjangkau oleh sistem penyediaan air minum perpipaan karena dapat dibangun secara mandiri oleh masyarakat dengan teknologi sederhana namun efektif. Biasanya, kedalaman sumur gali berkisar antara 5 hingga 15 meter, tergantung kondisi geologis setempat (Kementerian PUPR RI, 2017).

Air yang diperoleh dari sumur gali berasal dari air tanah dangkal (*phreatic water*), yang berada di atas lapisan kedap air pertama. Akuifer jenis ini sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan tanah, curah hujan, dan aktivitas manusia di sekitar sumur. Oleh karena itu, sumur gali sangat

rentan terhadap pencemaran dari limbah domestik seperti *septic tank*, tempat sampah, atau penggunaan pupuk dan pestisida di lahan pertanian. Jika tidak dibangun dan dikelola dengan standar sanitasi yang memadai, air dari sumur gali dapat menjadi sumber penyakit berbasis air seperti diare dan kolera (Rufaedah *et al.*, 2021).

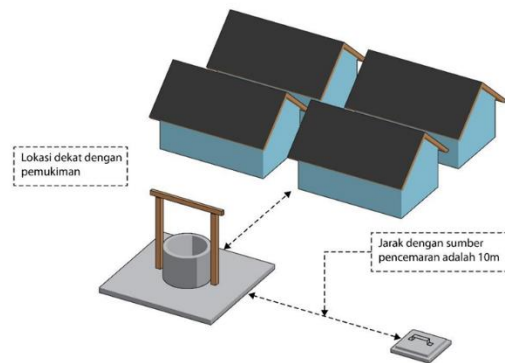
Keunggulan utama dari sumur gali adalah biaya pembangunan yang relatif rendah dan kemudahan dalam pelaksanaan, sehingga banyak digunakan oleh masyarakat berpenghasilan rendah. Selain itu, proses penggalian bisa dilakukan secara gotong royong dengan tenaga lokal. Namun, kelemahannya adalah ketergantungan tinggi terhadap musim dan lingkungan sekitar. Pada musim kemarau, banyak sumur gali mengalami penurunan debit air bahkan mengering, sedangkan pada musim hujan, risiko pencemaran meningkat akibat rembesan dari permukaan tanah.

## 2. Syarat Lokasi

Penentuan lokasi pembangunan sumur gali merupakan aspek krusial yang dapat menentukan kualitas air yang dihasilkan dan risiko tingkat pencemaran yang mungkin terjadi. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2916-1992 perencanaan sumur gali untuk sumber air bersih harus memenuhi ketentuan teknis. Hal yang harus diperhatikan dalam menentukan lokasi penempatan sumur gali adalah sebagai berikut (Kementerian PUPR RI, 2017):

- a) Lokasi mudah dijangkau atau tidak terlalu jauh dari rumah-rumah sekitar.

- b) Penentuan lokasi yang layak untuk sumur gali yang akan digunakan untuk umum harus dimusyawarahkan terlebih dahulu.
- c) Jarak sumur gali dengan sumber pencemar seperti cubluk, *septic tank*, pembuangan sampah, dan lainnya adalah 10 meter.
- d) Sumur air bersih yang digunakan secara bersama (komunail) maka jarak ke pemakai maksimal 50 cm.
- e) Sumur tidak boleh terendam banjir.



Gambar 2.1 Denah Bentuk Sumur  
Sumber: Kementerian PUPR RI (2017)

### 3. Syarat Konstruksi

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2916-1992 perencanaan sumur gali untuk sumber air bersih harus memenuhi ketentuan teknis. Beberapa aspek penting yang harus diperhatikan dalam konstruksi sumur untuk menjamin perlindungan terhadap potensi pencemaran adalah sebagai berikut:

#### a. Jarak Sumber Pencemar

Faktor utama yang memengaruhi kualitas air sumur gali adalah jarak antara sumur dengan sumber pencemar domestik seperti *septic tank*,



jamban, kandang ternak dan tempat pembuangan sampah. Kontaminasi dari sumber-sumber ini dapat menyebabkan pencemaran mikrobiologis dan kimia, termasuk nitrat, yang berasal dari dekomposisi limbah organik. Berdasarkan SNI 03-2916-1992 perencanaan sumur gali, jarak minimal antara sumur gali dengan sumber pencemar adalah 10 meter, untuk mencegah infiltrasi limbah ke dalam akuifer dangkal yang menjadi sumber air sumur gali (Kementerian PUPR RI, 2017).

b. Dinding Sumur

Konstruksi sumur gali harus memenuhi persyaratan teknis yang bertujuan untuk mencegah pencemaran dan menjaga kualitas air yang dihasilkan. Berdasarkan SNI 03-2916-1992 perencanaan sumur gali, salah satu syarat utama adalah bahwa dinding sumur harus dibuat dengan bahan yang kuat dilapisi dengan material kedap air seperti beton atau batu bata yang direkatkan dengan semen. Pelapisan ini wajib dilakukan minimal sedalam 3 meter dari permukaan tanah, untuk mencegah rembesan limbah permukaan masuk ke dalam sumur (Kementerian PUPR RI, 2017).

c. Bibir Sumur

Berdasarkan SNI 03-2916-1992 perencanaan sumur gali syarat lainnya adalah posisi bibir sumur harus lebih tinggi setidaknya 80 cm dari permukaan tanah di sekitarnya. Hal ini penting untuk mencegah air limpasan masuk saat hujan deras atau genangan terjadi di sekitar sumur. Sebaiknya bibir sumur diberi penutup agar hujan dan kotoran lainnya

tidak dapat masuk ke dalam sumur (Kementerian PUPR RI, 2017). Menurut Lestari *et al.* (2023), sumur dengan posisi lebih rendah dari tanah sekelilingnya memiliki kemungkinan dua kali lipat lebih besar terkontaminasi dibandingkan dengan sumur yang dibangun di permukaan lebih tinggi. Posisi ini juga memudahkan pengaliran air hujan menjauh dari bibir sumur.

d. Lantai Sumur

Sekeliling bibir sumur juga diwajibkan memiliki lantai pelindung (*platform*) yang terbuat dari bahan kedap air seperti semen, dengan kemiringan menjauhi sumur agar air limpasan mengalir ke luar. Berdasarkan SNI 03-2916-1992 perencanaan sumur gali, lebar minimum *platform* adalah 1 meter dari tepi bibir sumur dengan kemiringan 1-5% ke arah saluran pembuangan dan harus dalam kondisi utuh tanpa retakan/bocor. Keberadaan *platform* ini bukan hanya bersifat teknis tetapi juga preventif terhadap pencemaran (Kementerian PUPR RI, 2017).

e. Kerekan Timba

Berdasarkan SNI 03-2916-1992 tentang Perencanaan Sumur Gali, sumur gali pada umumnya ditimba menggunakan kerekan timba. Oleh karena itu, perlu dilengkapi denganudukan kerekan yang didukung oleh dua tiang, yang dapat terbuat dari pasangan bata, beton, atau tiang besi (Kementerian PUPR RI, 2017).

f. Saluran Pembuangan Air Limbah

Sistem pembuangan air bekas (drainase) di sekitar sumur juga merupakan bagian penting dari syarat konstruksi. Drainase ini harus mengalirkan air bekas cuci tangan, cucian, atau air limpasan ke saluran pembuangan yang jauh dari sumur. Jika tidak ada sistem drainase, air bekas akan tergenang di sekitar bibir sumur dan meningkatkan risiko rembesan. Berdasarkan SNI 03-2916-1992 perencanaan sumur gali, saluran pembuangan dibuat dari tembok yang kedap air dan panjangnya sekurang-kurangnya 10 meter di sekitar lantai saluran pembuangan dibuat dengan kemiringan 2% ke arah sarana pengolahan air buangan dan badan penerima agar tidak terjadi genangan air. Keberadaan saluran pembuangan menjadi salah satu indikator penilaian risiko pencemaran. Semakin baik drainasenya, semakin rendah skor risiko pencemarannya (Kementerian PUPR RI, 2017).

**C. Nitrat**

1. Pengertian Nitrat

Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) adalah senyawa kimia anorganik yang terdiri dari satu atom nitrogen dan tiga atom oksigen, yang terbentuk secara alami melalui proses nitrifikasi di dalam tanah. Dalam lingkungan, nitrat berasal dari oksidasi senyawa nitrogen seperti amonia dan nitrit oleh mikroorganisme nitrifikasi. Nitrat sangat mudah larut dalam air dan dapat berpindah bersama aliran air ke dalam sistem perairan atau akuifer. Karena sifatnya yang sangat mobil dan tidak mudah mengendap, nitrat merupakan

kontaminan utama dalam air tanah, terutama di wilayah pertanian intensif (WHO, 2017).

Dalam konteks kesehatan lingkungan, nitrat diklasifikasikan sebagai kontaminan kimia yang penting untuk dimonitor dalam air minum. Menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023, nitrat merupakan salah satu parameter kimia wajib dalam penilaian kualitas air bersih, baik untuk konsumsi maupun sanitasi. Konsentrasi nitrat yang tinggi dalam air sumur dapat berasal dari penggunaan pupuk nitrogen seperti urea dan Nitrogen, Posfor, Kalium (NPK), limbah domestik dari *septic tank*, serta penguraian bahan organik di tanah. Proses pergerakan nitrat sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah, hujan, dan topografi, sehingga sumur yang dangkal atau tidak terlindungi lebih rentan tercemar (Musfirah *et al.*, 2023).

Nitrat sebenarnya tidak beracun secara langsung, tetapi dalam tubuh manusia, nitrat dapat mengalami reduksi menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), yang bersifat lebih reaktif dan berpotensi toksik. Nitrit dapat bereaksi dengan hemoglobin dalam darah membentuk methemoglobin, sehingga mengganggu kemampuan darah dalam mengikat oksigen. Kondisi ini dikenal sebagai *methemoglobinemia* atau "*Blue Baby Syndrome*" pada bayi, yang menjadi perhatian utama dalam standar kualitas air minum oleh WHO dan Kementerian Kesehatan (Sriagustini *et al.*, 2021). Oleh sebab itu, kontrol kadar nitrat dalam air minum sangat penting untuk mencegah dampak kesehatan jangka pendek dan panjang.

Sumber utama nitrat dalam lingkungan berasal dari aktivitas antropogenik, terutama pertanian dan limbah domestik. Penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dan sistem sanitasi terbuka seperti *septic tank* yang bocor dapat meningkatkan kandungan nitrat di dalam tanah dan akhirnya mencemari air tanah. Hal ini diperparah jika sumur dibangun tanpa perlindungan atau terlalu dekat dengan lahan pertanian. Studi oleh Dewi *et al.*, (2016) menunjukkan bahwa sumur yang terletak dalam radius kurang dari 50 meter dari sawah memiliki kadar nitrat di atas ambang batas baku mutu.

Dalam sistem pemantauan kualitas air, nitrat dijadikan sebagai indikator pencemaran kimia dari aktivitas manusia dan salah satu parameter utama dalam survei sanitasi air sumur gali. Pemerintah Indonesia melalui Permenkes No. 2 Tahun 2023 menetapkan ambang batas maksimum nitrat sebesar 20 mg/L untuk air bersih dan air minum (Kementerian Kesehatan, 2023).

## 2. Karakteristik Tanah

### a. Tekstur Tanah

Tekstur tanah merupakan perbandingan relatif antara tiga fraksi utama: pasir, lanau, dan lempung. Tekstur tanah berperan penting dalam menentukan daya serap dan pergerakan air serta zat terlarut, termasuk nitrat. Tanah berpasir memiliki pori-pori besar sehingga memungkinkan air dan senyawa terlarut meresap dengan cepat ke dalam tanah. Hal ini membuat nitrat lebih mudah terbawa ke lapisan

akuifer, terutama saat curah hujan tinggi atau terjadi irigasi berlebihan. Sebaliknya, tanah berlempung dan liat memiliki pori lebih kecil dan mampu menahan air serta nutrisi lebih lama (Yuliani *et al.*, 2020).

Dalam konteks pencemaran air tanah, wilayah dengan dominasi tanah berpasir cenderung memiliki potensi *leaching* nitrat yang lebih tinggi. Hal ini diperkuat oleh studi Yuliani *et al.*, (2020) yang menemukan bahwa kadar nitrat dalam air tanah meningkat signifikan pada lahan dengan tekstur pasir dominan, terutama pada lokasi dekat lahan pertanian. Oleh karena itu, pengelolaan penggunaan pupuk nitrogen di daerah dengan tekstur tanah seperti ini harus lebih hati-hati. Penerapan teknologi pertanian presisi dan pengendalian penggunaan pupuk dapat menjadi solusi untuk meminimalkan pencemaran. Identifikasi tekstur tanah menjadi langkah awal dalam penilaian risiko sanitasi air sumur gali.

#### b. Struktur Tanah

Struktur tanah adalah pengaturan alami partikel tanah ke dalam agregat atau gumpalan. Struktur tanah yang baik memungkinkan aliran air dan udara yang optimal, serta mendukung aktivitas akar tanaman dan mikroorganisme tanah. Struktur remah atau granular umumnya ditemukan pada tanah atas yang subur, sedangkan struktur masif atau padat biasanya kurang menguntungkan untuk infiltrasi air. Tanah dengan struktur terlalu gembur dapat mempercepat pergerakan air dan

zat terlarut, termasuk nitrat, menuju ke bawah (Astuti, E and Hartono, 2023).

Struktur yang buruk seperti terlalu padat atau berlapis keras dapat menghambat pergerakan air dan mengakibatkan akumulasi nitrat di lapisan permukaan. Namun demikian, struktur terlalu gembur juga meningkatkan risiko leaching, karena air bergerak cepat membawa nitrat ke bawah sebelum sempat diserap oleh tanaman. Dalam studi Widodo *et al.*, (2021), tanah dengan struktur terlalu remah menunjukkan kehilangan nitrogen yang tinggi setelah pemupukan, karena nitrat tercuci sebelum digunakan tanaman. Oleh sebab itu, pemahaman struktur tanah penting dalam pengelolaan pertanian dan lokasi pembangunan sumur.

c. Permeabilitas dan Porositas

Permeabilitas tanah adalah kemampuan tanah untuk meloloskan air, sedangkan porositas mengacu pada volume ruang antar partikel tanah. Keduanya sangat menentukan laju infiltrasi dan pergerakan zat terlarut dalam tanah, termasuk nitrat. Tanah dengan porositas tinggi seperti pasir memungkinkan air dan nitrat bergerak cepat menuju air tanah. Sebaliknya, tanah liat memiliki permeabilitas rendah dan cenderung menahan air di lapisan permukaan (Firdaus et al., 2022).

Tingginya permeabilitas tanah di lahan pertanian menyebabkan tingginya risiko pencemaran akuifer dangkal. Jika pupuk nitrogen diaplikasikan berlebihan, nitrat yang tidak diserap tanaman akan segera

terbawa oleh air ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam. Ini menjadi masalah besar jika air tanah dangkal digunakan sebagai sumber air minum, seperti pada sumur gali. Yuliani *et al.*, (2020) mencatat bahwa lahan pertanian dengan permeabilitas tinggi menghasilkan kadar nitrat lebih tinggi di sumur gali terdekat, terutama saat musim hujan.

d. Kapasitas Tukar Kation (KTK)

Kapasitas Tukar Kation (KTK) adalah kemampuan tanah untuk menahan dan menukar ion bermuatan positif (kation) di antara permukaan partikel tanah dan larutan tanah. Meskipun nitrat merupakan anion (ion negatif), KTK tetap relevan karena menunjukkan daya ikat tanah terhadap berbagai unsur hara. Tanah dengan KTK tinggi seperti tanah liat dan organik dapat mempertahankan keseimbangan nutrisi, sehingga lebih stabil dalam menyerap dan menyimpan unsur-unsur penting bagi tanaman. Sementara itu, tanah dengan KTK rendah seperti pasir, lebih sulit mempertahankan unsur tersebut (Kusuma and Widodo, 2021).

Dalam konteks pencemaran nitrat, tanah dengan KTK rendah tidak mampu menahan nitrat dalam zona perakaran, sehingga nitrat lebih cepat tercuci ke bawah. Hal ini membuat peran KTK sangat penting dalam pengelolaan hara dan perlindungan kualitas air tanah. Dalam studi oleh Firdaus *et al.*, (2022), wilayah dengan tanah ber-KTK rendah menunjukkan risiko pencemaran nitrat lebih tinggi dibandingkan tanah dengan kandungan mineral lempung yang tinggi. Oleh karena itu, KTK



perlu menjadi bagian dari penilaian dalam survei lokasi pertanian dan pembangunan sumur.

e. Kandungan Bahan Organik

Bahan organik tanah terdiri dari sisa-sisa tumbuhan dan hewan yang mengalami dekomposisi. Kandungan bahan organik tinggi dapat meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki struktur, dan meningkatkan kapasitas tukar kation. Selain itu, bahan organik menyediakan energi bagi mikroorganisme tanah yang berperan dalam proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Proses ini mengubah senyawa nitrogen menjadi bentuk yang lebih larut, termasuk nitrat Widodo *et al.*, (2021).

Namun, apabila tidak dikelola dengan baik, bahan organik yang berlimpah justru mempercepat akumulasi nitrat dalam tanah. Jika kadar nitrat berlebih dan tidak diserap tanaman, nitrat akan mudah tercuci ke dalam air tanah. Widodo *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa penggunaan pupuk organik yang tidak seimbang pada tanah dengan bahan organik tinggi menghasilkan leaching nitrat yang signifikan. Oleh karena itu, meskipun bahan organik penting untuk kesuburan, pengelolaannya harus disesuaikan dengan kapasitas serapan tanaman dan jenis tanahnya.

### 3. Proses Infiltrasi Nitrat Pada Air Tanah

Infiltrasi nitrat ke dalam air tanah dimulai dari kegiatan di permukaan tanah yang memproduksi senyawa nitrogen dalam bentuk nitrat

( $\text{NO}_3^-$ ), seperti penggunaan pupuk anorganik pada pertanian intensif. Senyawa ini bersifat sangat larut dalam air sehingga mudah terbawa aliran air hujan atau irigasi menuju ke lapisan bawah tanah. Studi oleh Handayani & Supriyadi (2021) menunjukkan bahwa infiltrasi nitrat dipengaruhi oleh struktur tanah dan intensitas curah hujan di daerah pertanian lahan basah di Jawa Tengah, di mana konsentrasi nitrat meningkat selama musim penghujan.

Setelah memasuki tanah, nitrat akan bergerak melalui pori-pori tanah bersama dengan air yang meresap ke dalam zona tidak jenuh. Kecepatan pergerakan ini dipengaruhi oleh tekstur tanah, tingkat kejenuhan air, dan keberadaan vegetasi. Dalam tanah berpasir, misalnya, nitrat lebih cepat terinfiltrasi ke lapisan bawah karena rendahnya kapasitas penahan air. Riset oleh Sari & Yustina (2020) di Sumatera Selatan mencatat bahwa area dengan tanah lempung memiliki laju infiltrasi lebih lambat, namun tetap berisiko mencemari air tanah jika beban nitrat tinggi secara terus-menerus.

Proses selanjutnya adalah mencapai zona jenuh, yakni lapisan akuifer air tanah. Di sinilah nitrat dapat bercampur dengan air tanah dan ikut mencemari air sumur gali yang digunakan sebagai sumber air bersih dan air minum masyarakat. Kandungan nitrat dalam air tanah yang melebihi ambang batas aman yaitu 20 mg/L dapat berakibat buruk bagi kesehatan manusia. Menurut penelitian oleh Pramono, A. (2022), daerah-daerah pertanian intensif di Yogyakarta menunjukkan adanya peningkatan

kadar nitrat di sumur dangkal, terutama pada wilayah tanpa sistem pengelolaan limbah pertanian yang memadai.

#### 4. Dampak Terhadap Kesehatan Manusia

Paparan nitrat yang berlebihan melalui konsumsi air yang terkontaminasi atau penggunaannya sebagai air bersih dapat memberikan dampak serius bagi kesehatan manusia, terutama jika kadar nitrat dalam air melebihi batas yang aman. Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) pada awalnya tidak berbahaya bagi tubuh manusia, namun setelah dikonsumsi, ia dapat tereduksi menjadi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dalam saluran pencernaan. Nitrit yang terbentuk kemudian dapat mengikat hemoglobin dalam darah dan mengubahnya menjadi methemoglobin, yang tidak mampu mengikat oksigen dengan efektif. Kondisi ini dikenal sebagai *methemoglobinemia* atau lebih sering disebut sindrom bayi biru, yang terutama berisiko terjadi pada bayi yang lebih muda dari 6 bulan. Pada bayi, methemoglobinemia dapat mengakibatkan gejala seperti sianosis (warna kulit kebiru-biruan), kesulitan bernapas, dan dalam kasus yang parah, dapat menyebabkan kematian jika tidak segera ditangani. Penurunan kemampuan darah untuk membawa oksigen sangat berbahaya bagi bayi karena sistem peredaran darah mereka belum sepenuhnya berkembang (Haryani, 2021).

Selain risiko *methemoglobinemia*, paparan nitrat jangka panjang pada manusia juga dapat meningkatkan risiko kanker, terutama kanker lambung dan saluran pencernaan lainnya. Nitrit yang terbentuk dari reduksi nitrat dapat bereaksi dengan amina sekunder yang ada dalam tubuh untuk

membentuk senyawa *N-nitroso*, yang merupakan karsinogen kuat. Sebagai contoh, sebuah studi oleh Setyowati & Hartati (2020) di Jawa Barat menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap air yang mengandung nitrat di daerah pertanian berhubungan dengan peningkatan kejadian kanker saluran cerna. Senyawa *N-nitroso* ini dapat merusak DNA dan meningkatkan mutasi sel, yang akhirnya dapat menyebabkan perkembangan sel kanker. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa kadar nitrat dalam air minum tidak melebihi standar yang ditetapkan oleh WHO atau Kementerian Kesehatan Indonesia.

Di sisi lain, paparan nitrat yang berlebihan juga dapat memengaruhi sistem endokrin dan reproduksi. Penelitian oleh Wibowo, S. (2022) di Sumatra menemukan bahwa konsentrasi nitrat yang tinggi dalam air minum dapat memengaruhi fungsi tiroid dan hormon reproduksi pada pria dan wanita. Nitrat dan nitrit diketahui dapat mengubah keseimbangan hormon, memengaruhi kesuburan, serta meningkatkan risiko gangguan hormon lainnya. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa paparan nitrat dapat menyebabkan masalah menstruasi pada wanita dan gangguan pada produksi sperma pada pria, yang berpotensi mengurangi kesuburan.

#### **D. Faktor Yang Memengaruhi Kadar Nitrat**

##### **1. Konstruksi Sumur**

Konstruksi sumur gali mencakup seluruh elemen fisik dari sumur, mulai dari jarak sumur, dinding sumur, lantai sumur, bibir sumur, saluran pembuangan air, dan kerekan. Sumur gali yang dibangun tanpa

memperhatikan standar konstruksi sangat rentan terhadap kontaminasi lingkungan, khususnya dari limbah domestik dan pertanian. Menurut SNI 03-2916-1992 tentang perencanaan sumur gali, konstruksi sumur yang aman harus dilengkapi dengan pelapis kedap air dengan minimal kedalaman 3 meter, bibir sumur yang lebih tinggi dari permukaan tanah minimum 80 cm, memiliki lebar lantai minimum 1 meter dengan kemiringan 1-5% dan jarak antara sumur dengan sumber pencemar sekurang-kurangnya 10 meter serta memiliki saluran pembuangan air limbah (SPAL). Hal ini bertujuan untuk mencegah masuknya air permukaan atau air limbah ke dalam sumur.

Salah satu faktor utama yang memengaruhi kualitas air sumur gali adalah jarak antara sumur dengan sumber pencemar domestik seperti *septic tank*, jamban, kandang ternak dan tempat pembuangan sampah. Kontaminasi dari sumber-sumber ini dapat menyebabkan pencemaran mikrobiologis dan kimia, termasuk nitrat, yang berasal dari dekomposisi limbah organik. Berdasarkan SNI 03-2916-1992 perencanaan sumur gali, jarak minimal antara sumur gali dengan sumber pencemar adalah 10 meter, untuk mencegah infiltrasi limbah ke dalam akuifer dangkal yang menjadi sumber air sumur (Kementerian PUPR RI, 2017).

Menurut penelitian oleh Sriagustini *et al.*, 2021), sumur gali yang berada dalam radius kurang dari 10 meter dari *septic tank* menunjukkan kadar nitrat lebih tinggi dibandingkan sumur yang memiliki jarak lebih dari 15 meter. Hal ini karena nitrat dari feses manusia terlarut dan masuk ke

dalam air tanah melalui rekahan tanah atau saluran air bawah permukaan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa sumur tanpa pelindung atau penutup lebih rentan terhadap kontaminasi.

Penelitian oleh Sriagustini *et al.* (2021) mengungkapkan bahwa sumur dengan lantai retak menunjukkan kadar nitrat dan bakteri *coliform* yang lebih tinggi dibandingkan sumur dengan konstruksi baik. Lantai di sekitar sumur yang retak memungkinkan air hujan atau air buangan yang tercemar mengalir langsung ke dalam sumur tanpa proses filtrasi alami oleh tanah sehingga memperbesar potensi akumulasi cemaran nitrat pada air sumur gali. Hal ini menjadi penyebab umum pencemaran mikrobiologis dan kimiawi pada air sumur gali di pedesaan.

Komponen penting lain dalam konstruksi sumur adalah sistem saluran pembuangan air limbah di sekitar sumur. Tanpa drainase yang baik, air permukaan yang mengandung bahan pencemar bisa menggenang dan meresap ke dalam sumur melalui retakan atau celah pada lantai sumur. Dalam penelitian oleh Sutardi *et al.* (2017), sumur gali yang dibangun di lingkungan datar tanpa saluran pembuangan air memperlihatkan konsentrasi nitrat lebih tinggi dibandingkan sumur yang berada di area miring dengan saluran air yang baik. Drainase yang efektif dapat mengurangi laju aliran air tercemar ke area sumur.

Dinding sumur juga menjadi komponen penting dalam konstruksi sumur untuk mencegah terjadinya pencemaran. Studi yang Syafarida *et al.* (2022) dan Ardhaneswari and Wispriyono (2022), mengungkapkan bahwa

dinding sumur yang tidak kedap air akan meningkatkan potensi perembesan air tercemar dari permukaan ke dalam akuifer. Selain itu, dapat mengalami pencemaran vertikal dari aktivitas pertanian yang masuk ke dalam akuifer dan menyebabkan peningkatan kadar nitrat pada air sumur. Penelitian yang dilakukan Dewi, I. R. (2021), menerangkan bahwa bibir sumur yang tidak lebih tinggi dari permukaan tanah di sekitarnya dapat berpotensi meningkatkan masuknya air permukaan ke dalam sumur, yang dapat membawa cemaran nitrat dari limbah organik.

Sumur dengan konstruksi yang memenuhi syarat akan mencegah terjadinya pencemaran akibat polutan yang berasal dari permukaan. Triyono, *et al.* (2014) juga menjelaskan bahwa sumur dengan konstruksi yang baik memiliki kemampuan untuk membatasi pergerakan zat pencemar dari permukaan tanah menuju air tanah dangkal. Apabila semua komponen konstruksi sumur tersebut tidak terpenuhi maka potensi cemaran nitrat baik dari aktivitas pertanian maupun dari limbah domestik dapat meningkat. Oleh karena itu, penting untuk membangun sumur dengan mengikuti syarat konstruksi yang telah ditetapkan sesuai dengan SNI 03-2916-1992 tentang perencanaan sumur gali, karena dapat melindungi sumur gali dari adanya pencemaran dari mikroorganisme dan bahan kimia.

## 2. Pemupukan

### a. Jenis Pupuk

Pupuk adalah bahan yang digunakan untuk menyediakan unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman untuk tumbuh dan berkembang. Pupuk

digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah dan hasil pertanian. Pupuk dapat dibagi menjadi dua jenis utama yaitu pupuk anorganik (kimia) dan pupuk organik. Setiap jenis pupuk memiliki karakteristik dan dampak yang berbeda terhadap kualitas tanah dan lingkungan.

Pupuk anorganik atau pupuk kimia adalah pupuk yang mengandung unsur-unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman dalam bentuk senyawa kimia yang sudah diproses. Beberapa jenis pupuk kimia yang umum digunakan di Indonesia antara lain urea, Nitrogen, Posfor, Kalium (NPK) dan Diamonium Fosfat (DAP). Pupuk urea mengandung nitrogen tinggi, yang merupakan unsur penting bagi pertumbuhan tanaman, tetapi jika digunakan secara berlebihan, nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) yang terbentuk bisa mencemari air tanah melalui infiltrasi (Setyowati & Hartati 2020).

Nitrat yang terbawa oleh aliran air hujan atau irigasi akan meresap ke dalam tanah, dan jika sumur terlalu dekat dengan sumber kontaminasi tersebut, maka air sumur bisa terkontaminasi. Menurut Haryani, *et al.* (2021), penggunaan pupuk kimia secara berlebihan berisiko besar mencemari air tanah dengan nitrat, yang menjadi sumber pencemaran potensial bagi sumur gali, khususnya yang digunakan untuk air minum.

Pupuk organik berasal dari bahan alami seperti kompos, pupuk kandang, dan pupuk hijau. Pupuk ini tidak hanya memberikan unsur hara, tetapi juga memperbaiki struktur tanah dengan meningkatkan



kandungan bahan organik, yang pada gilirannya meningkatkan kapasitas tanah dalam menyerap dan menahan air. Pupuk organik umumnya lebih ramah lingkungan dibandingkan pupuk kimia, karena tidak mengandung bahan kimia yang dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari sumber air tanah (Rahmawati, N., 2021).

b. Waktu Pemupukan

Waktu pemupukan merupakan salah satu faktor kunci yang memengaruhi efisiensi serapan nutrisi oleh tanaman dan meminimalisir kehilangan unsur hara ke lingkungan. Dalam sistem budidaya padi sawah, pemupukan umumnya dilakukan secara bertahap sesuai dengan fase pertumbuhan tanaman, yaitu fase vegetatif, bunting, dan generatif. Pemupukan yang tidak sesuai fase pertumbuhan berisiko meningkatkan kehilangan hara terutama nitrogen, melalui proses pelindian (*leaching*) yang dapat mencemari air tanah (Widodo *et al.*, 2021).

Menurut Suryani, D., & Wahyuni, (2020), pemupukan nitrogen (urea) yang optimal dilakukan sebanyak dua kali, yaitu pada umur tanaman 7–10 hari setelah tanam (HST) dan kedua pada 30 HST. Pemupukan fosfor dan kalium (seperti TSP dan KCl) sebaiknya diberikan pada awal tanam untuk mendukung pertumbuhan akar. Waktu pemupukan ini telah terbukti meningkatkan efisiensi pemupukan dan mengurangi akumulasi nitrat di tanah yang berpotensi masuk ke air tanah bila dilakukan secara bersamaan dalam jumlah besar.

Penelitian oleh Putra *et al.* (2022) di Kabupaten Sragen menunjukkan bahwa pemupukan nitrogen yang dilakukan secara bertahap (*split application*) mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk hingga 25% dan mengurangi emisi nitrogen ke lingkungan. Hal ini penting dalam pengelolaan pertanian berkelanjutan, di mana pertumbuhan tanaman tetap optimal namun pencemaran lingkungan dapat ditekan. *Split application* juga mengurangi risiko nitrat larut masuk ke sumur gali, terutama di daerah yang menggunakan air tanah sebagai sumber utama.

Secara umum, waktu pemupukan harus disesuaikan dengan kebutuhan fisiologis tanaman. Pada fase vegetatif, nitrogen sangat dibutuhkan untuk pertumbuhan daun dan batang. Pada fase generatif, pupuk kalium dan fosfor lebih dominan untuk mendukung pembentukan malai dan pengisian bulir. Kesalahan waktu pemupukan, terutama pemberian pupuk nitrogen yang terlalu awal atau terlalu lambat, menyebabkan hara tidak termanfaatkan secara optimal dan sisanya akan tercuci ke tanah, meningkatkan kadar nitrat dalam air tanah (Rachman *et al.*, 2021).

c. Jarak Sawah Terhadap Sumur Gali

Kadar nitrat pada air sumur gali dipengaruhi oleh kedekatan sumur dengan sumber air permukaan di sekitarnya, salah satunya adalah lahan pertanian seperti sawah. Jarak antara sumur gali dan lahan persawahan menjadi faktor penting yang berkontribusi terhadap variasi konsentrasi

nitrat di dalam air tanah. Semakin dekat lokasi sumur dengan area pertanian, maka semakin tinggi pula potensi peningkatan konsentrasi nitrat. Hal ini disebabkan oleh aktivitas pertanian, khususnya penggunaan pupuk berbasis nitrogen seperti urea dan Nitrogen, Posfor, Kalium (NPK), yang dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi.

Selain itu, jarak sawah terhadap sumur gali juga berperan dalam mereduksi kadar nitrat pada air sumur gali. Seiring bertambahnya jarak, air yang mengandung nitrat dari lahan pertanian akan melewati berbagai proses alami yang terjadi dalam tanah. Proses alami dalam tanah tersebut menjadi penentu utama berkurangnya konsentrasi nitrat sebelum mencapai air sumur. Proses dilusi terjadi ketika air tanah yang terkontaminasi nitrat dari area persawahan bercampur dengan air tanah yang memiliki kadar nitrat lebih rendah. Pencampuran ini menyebabkan penurunan konsentrasi nitrat secara bertahap di sepanjang jalur aliran air tanah. Menurut Said and Syabani (2014), proses pengenceran alami di bawah permukaan tanah berkontribusi terhadap penurunan kadar senyawa nitrogen terlarut melalui mekanisme pencampuran air dengan konsentrasi berbeda. Penelitian oleh Ardhaneswari and Wispriyono (2022) juga menemukan bahwa kadar nitrat dalam air tanah di sekitar lahan pertanian berkurang seiring bertambahnya jarak sumur dari sumber pencemaran utama.

Selanjutnya, dispersi hidrodinamik juga memiliki peran penting. Proses ini merupakan penyebaran zat terlarut akibat variasi kecepatan aliran air dalam pori-pori tanah, sehingga plume nitrat yang berasal dari sawah menyebar ke area yang lebih luas dan konsentrasinya menurun (Sukma, 2006). Semakin jauh jarak antara sawah dan sumur, maka semakin besar efek penyebaran ini, yang pada akhirnya menurunkan kadar nitrat yang terbawa menuju air sumur gali.

Selain dua mekanisme fisik tersebut, denitrifikasi biologis merupakan proses yang paling signifikan dalam mereduksi nitrat. Denitrifikasi terjadi pada kondisi tanah yang anoksik atau miskin oksigen, ketika bakteri anaerob fakultatif seperti *Pseudomonas* menggunakan nitrat sebagai akseptor elektron dan mengubahnya menjadi gas nitrogen ( $N_2$ ) yang lepas ke udara. Herlambang (2003) menjelaskan bahwa proses denitrifikasi efektif dalam menurunkan kadar nitrat pada air tanah maupun air limbah yang kaya nitrogen. Dengan demikian, semakin jauh jarak antara sawah dan sumur, semakin lama waktu kontak air dengan lapisan tanah dan mikroorganisme, sehingga proses dilusi, dispersi, dan denitrifikasi dapat berlangsung lebih optimal.

Fenomena pengurangan kadar nitrat melalui gabungan proses tersebut menegaskan bahwa lapisan tanah di antara sawah dan sumur berfungsi sebagai zona atenuasi alami (*natural attenuation*). Singleton *et al.*, (2007) menjelaskan bahwa pada zona jenuh air (*saturated zone*),

proses denitrifikasi biologis yang didukung oleh mekanisme fisik dapat terjadi secara efektif untuk mereduksi kontaminasi nitrat seiring bertambahnya jarak tempuh air tanah. Hal ini menandakan bahwa area tanah di antara sumber pencemar dan sumur bukan sekadar ruang kosong, melainkan area reaktif tempat berlangsungnya proses degradasi polutan sebelum air dikonsumsi.

Penelitian yang dilakukan oleh Dewi *et al.*, (2016) menunjukkan bahwa sumur yang berada kurang dari 50 meter dari sawah berisiko tinggi tercemar nitrat. Pernyataan tersebut juga didukung oleh teori kesehatan lingkungan dari Chandra (2007), yang menegaskan bahwa jarak aman sumur gali terhadap sumber pencemar kimiawi idealnya adalah tidak kurang dari 50 meter. Nitrat dari pupuk mudah larut dalam air dan bergerak bersama aliran air ke lapisan tanah yang lebih dalam, hingga mencapai akuifer dangkal yang digunakan oleh sumur gali. Proses pergerakan nitrat dari permukaan lahan pertanian menuju air tanah dipengaruhi oleh tekstur dan struktur tanah, intensitas hujan, dan posisi topografi antara sawah dan sumur gali.

Jika sumur terletak pada area yang lebih rendah dari sawah, maka pergerakan air limpasan yang membawa nitrat akan lebih cepat masuk ke dalam sumur. Studi oleh Sriagustini *et al.*, (2021) menguatkan bahwa kontaminasi nitrat lebih tinggi ditemukan pada sumur-sumur yang berjarak dekat dari area pertanian intensif, terutama yang tidak memiliki pelindung struktur fisik yang baik seperti pelapis beton.

Penelitian oleh Lestari *et al.* (2023) di wilayah pesisir menunjukkan bahwa pencemaran air tanah oleh nitrat memiliki korelasi kuat dengan jarak antara lahan pertanian dan sumber air. Dalam penelitiannya, semakin dekat jarak sawah dengan sumur gali maka semakin tinggi risiko pencemaran nitrat dalam air sumur gali akibat infiltrasi.

### 3. Jenis Tanah

Jenis tanah sangat memengaruhi kemampuan suatu lahan dalam menyerap dan menyaring air, sehingga berpengaruh langsung terhadap kerentanan pencemaran air tanah, terutama oleh nitrat. Tanah dengan tekstur kasar seperti pasir memiliki pori-pori besar yang memungkinkan air dan zat terlarut, termasuk nitrat, meresap dengan cepat ke dalam tanah dan mencapai akuifer dangkal. Sebaliknya, tanah liat yang memiliki pori-pori kecil akan memperlambat infiltrasi, sehingga zat pencemar seperti nitrat cenderung tertahan lebih lama di lapisan atas tanah (Sutardi *et al.*, 2017).

Menurut penelitian Setyowati & Hartati (2020), tanah bertekstur pasir atau lempung berpasir memiliki risiko lebih tinggi terhadap pencemaran nitrat dibandingkan tanah lempung atau liat. Hal ini dikarenakan porositas tanah bertekstur kasar mempercepat pergerakan air yang mengandung nitrat menuju air tanah, apalagi jika curah hujan tinggi atau ada kelebihan pemupukan nitrogen. Oleh karena itu, jenis tanah harus dipertimbangkan dalam pembangunan sumur gali dan penerapan pemupukan.

Dalam penelitian ini, salah satu sampel yang digunakan adalah tanah sebelum dinding sumur sehingga perlu dilakukan proses penggalian pada tanah agar dapat menjangkau tanah yang telah terkontaminasi nitrat. Kedalaman pengambilan sampel tanah untuk analisis kandungan nitrat perlu mempertimbangkan distribusi vertikal nitrat di profil tanah. Beberapa studi menunjukkan bahwa akibat proses perkolasi dan leaching, nitrat cenderung terakumulasi pada lapisan subsoil sebelum mencapai muka air tanah. Menurut Addiscott, Whitmore, dan Powlson (1991), di lahan pertanian intensif, zona akumulasi nitrat umumnya berada pada kedalaman sekitar 0,6–1 meter dari permukaan tanah.

Hasil serupa dilaporkan oleh Paramasivam et al. (2001) yang menemukan konsentrasi nitrat tertinggi pada kedalaman 0,5–0,8 meter di tanah berpasir sebelum bergerak lebih dalam menuju air tanah. Pedoman USDA NRCS (2012) juga merekomendasikan pengambilan sampel hingga kedalaman 100 cm untuk mendeteksi akumulasi nitrat di subsoil, selain sampel lapisan atas (0–30 cm) yang digunakan untuk memantau input pupuk. Berdasarkan temuan-temuan tersebut, kedalaman penggalian tanah antara 0,5–1 meter dapat dianggap representatif untuk mendapatkan sampel tanah yang mengandung nitrat secara signifikan.

#### 4. Curah Hujan

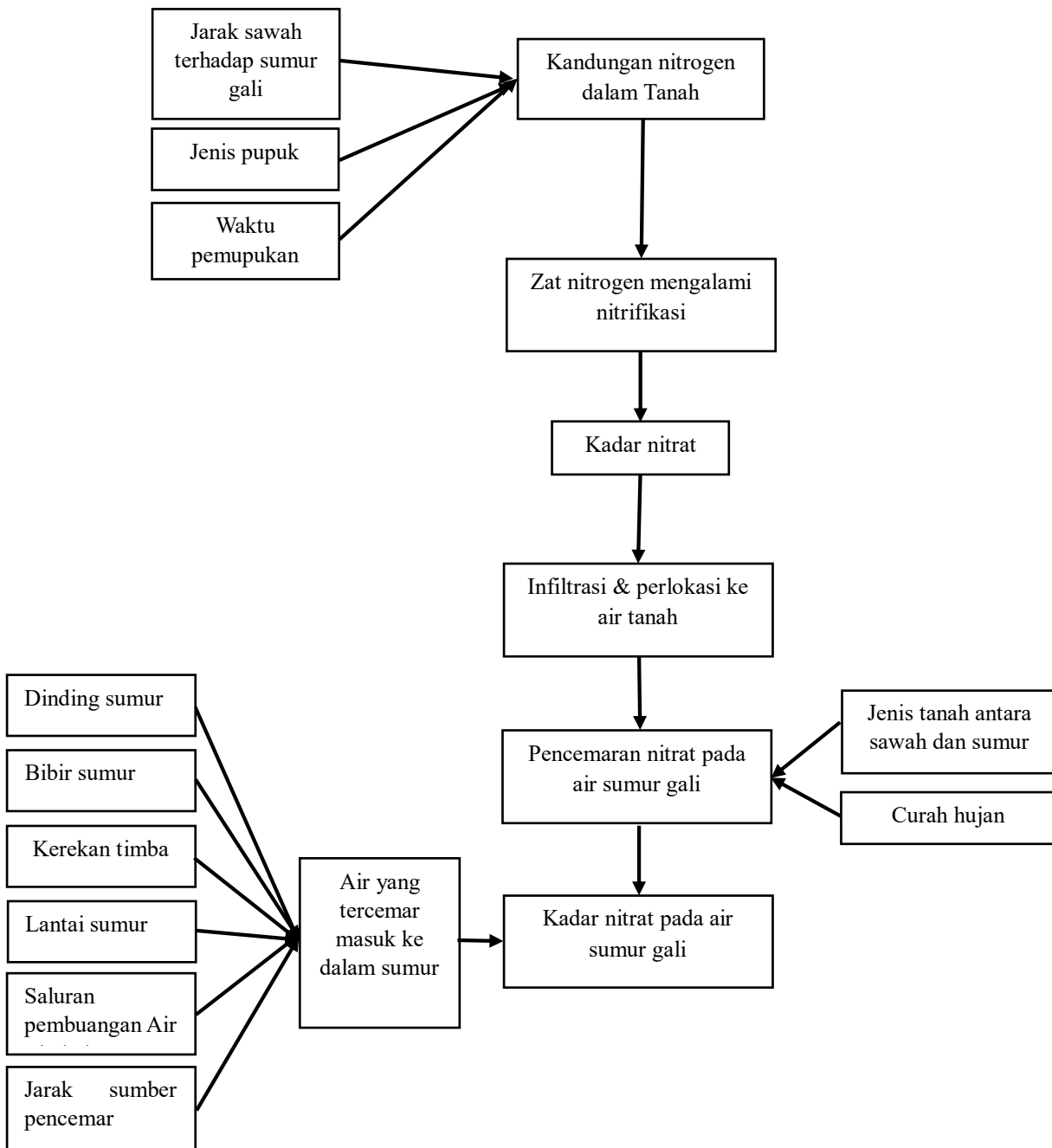
Curah hujan merupakan faktor alami yang sangat berpengaruh terhadap pergerakan zat terlarut, termasuk nitrat, dari permukaan tanah ke dalam lapisan air tanah. Saat curah hujan tinggi, air hujan mempercepat

proses infiltrasi dan pelindian (*leaching*), yang membawa residu pupuk, terutama nitrat, menuju lapisan akuifer. Menurut penelitian oleh Sriagustini *et al.*, 2021), meningkatnya curah hujan setelah pemupukan dapat meningkatkan kadar nitrat dalam air sumur secara signifikan, khususnya pada tanah berpori besar dan sistem drainase buruk.

Curah hujan yang tinggi juga mempercepat aliran permukaan (*runoff*) yang membawa bahan pencemar dari lahan pertanian menuju area sekitar sumur gali, terutama jika sumur tidak dilengkapi pelindung seperti penutup atau tembok pelindung. Studi oleh Sutardi *et al.* (2017) menunjukkan bahwa pada musim hujan, peningkatan kadar nitrat dalam air tanah cenderung lebih tinggi dibandingkan musim kemarau, dengan rata-rata kenaikan mencapai 40% di wilayah penelitian mereka di Wonosari, Yogyakarta.



### E. Kerangka Teori



Gambar 2.3 Kerangka Teori

Kerangka teori di atas merupakan modifikasi teori dari Kementerian PUPR RI (2017), Haryani, *et al.* (2021), Widodo *et al.* (2021), Chandra (2007), Suryani, D., & Wahyuni, (2020), Setyowati & Hartati (2020) dan Sutardi *et al.* (2017).