

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Bakteri *Escherichia coli*

1. Pengertian Bakteri *Escherichia coli*

Bakteri *Escherichia coli* merupakan jenis bakteri coliform yang tergolong dalam famili Enterobacteriaceae yaitu bakteri yang mampu hidup dan bertahan di dalam saluran pencernaan. Bakteri *Escherichia coli* disebut *Escherichia coli* patogen karena dapat menyebabkan penyakit pada manusia. Keberadaan bakteri *E. coli* umumnya berhubungan dengan kontaminasi yang berasal dari kotoran (feses), karena bakteri ini hidup pada di dalam usus manusia maupun hewan. Oleh karena itu, ditemukannya *E. coli* pada air atau pangan menunjukkan telah terjadi proses pengolahan yang terpapar oleh kotoran (Rahayu et al., 2018).

2. Karakteristik Bakteri *Escherichia coli*

Escherichia coli merupakan bakteri Gram negatif yang berukuran sekitar 1.0–1.5 μm x 2.0–6.0 μm . Bakteri ini dapat bersifat tidak motil maupun motil dengan adanya flagela serta mampu tumbuh dengan atau tanpa oksigen karena bersifat fakultatif anaerobik. Selain itu, bakteri ini mampu bertahan pada media dengan kandungan nutrisi yang rendah. Karakteristik biokimia *E. coli* lainnya adalah memiliki kemampuan untuk menghasilkan indol, kurang mampu memfermentasi sitrat, dan menunjukkan hasil negatif pada analisis urease (Rahayu et al., 2018)

Secara fisiologi *E. coli* mampu untuk bertahan pada kondisi yang sulit dan dapat tumbuh baik di air tawar, air laut, atau air tanah. *Escherichia coli* memiliki waktu generasi sekitar 30 sampai 87 menit bergantung dari suhu. Suhu optimum bagi pertumbuhan *E. coli* adalah 37° C dengan waktu tersingkat generasi selama 30 menit. *E. coli* memiliki lebih dari 50 regulon yang disebut *general stress response* (GSR) dengan beberapa fungsi pertahanan sel seperti ketahanan terhadap tekanan osmotik, panas, pH, stres oksidatif, dan kekurangan nutrisi. (Rahayu et al., 2018)

3. Patogenitas Bakteri *Escherichia coli*

Escherichia coli dapat menyebabkan timbulnya suatu gejala penyakit ketika berhasil masuk ke dalam tubuh inangnya. Bakteri ini mampu beradaptasi, bertahan, hingga menyerang sistem imun yang akhirnya menimbulkan penyakit. Proses patogenesis *Escherichia coli* dimulai dari kolonisasi pada area tertentu di permukaan usus (sel mukosa), pembelahan sel, merusak sel usus, melintasi sel usus dan penetrasi ke dalam aliran darah, penempelan pada organ target, hingga akhirnya merusak organ (Rahayu et al., 2018)

Sebagian besar strain *E. coli* patogen menyerang bagian luar sel inang, namun tipe *Enteroinvasive Escherichia coli* (EIEC) memiliki kemampuan untuk menembus dan bereplikasi di dalam sel mukosa usus serta makrofag. Sifat patogenik *E. coli* diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis berdasarkan mekanisme patogenitas, virulensi, serta sindrom klinis yang ditimbulkan (Rahayu et al., 2018).

4. Bahaya *Escherichia coli* Patogen

Escherichia coli patogen dapat menyebabkan tiga jenis infeksi utama pada manusia, yaitu infeksi saluran pencernaan yang menyebabkan diare, infeksi pada saluran kemih, serta meningitis pada bayi baru lahir (meningitis neonatal) (Rahayu et al., 2018).

B. Air Bersih

Air bersih adalah air yang digunakan untuk kebutuhan sehari-hari dengan kualitas yang memenuhi persyaratan kesehatan air bersih serta aman untuk diminum setelah melalui proses perebusan (Akbar et al., 2021). Kualitas air bersih meliputi fisika, kimia, biologi, dan radioaktif perlu dilakukan pemantauan secara kontinyu. Ketika salah satu parameter melebihi baku mutu perlu dilakukan penyehatan air untuk menjamin tersedianya air yang sesuai dengan baku mutu.

1. Sumber Air Bersih

Air bersih dapat berasal dari air permukaan, air angkasa, air tanah, serta air PAM (Khambali et al., 2023).

a. Air Permukaan

Air permukaan merupakan air hujan yang mengalir di atas permukaan bumi. Dalam proses alirannya, air tersebut dapat tercemar oleh berbagai bahan pencemar seperti lumpur, batang-batang kayu, daun-daun, limbah industri kota, dan berbagai material lainnya (Khambali et al., 2023).

b. Air Angkasa

Air angkasa atau air hujan adalah air murni yang berasal dari sublimasi uap air di udara yang ketika turun melarutkan benda-benda di udara yang dapat mengotori dan mencemari air hujan.

c. Air Tanah

Air tanah berasal dari air hujan yang meresap ke dalam lapisan bumi dan tertahan di dalamnya. karena sudah melalui lapisan-lapisan berpori air ini umumnya bebas dari zat tersuspensi dan kaya akan mineral. Berdasarkan letaknya, air tanah dibedakan menjadi dua, yaitu:

1) Air tanah freatik (dangkal)

Air tanah pada permukaan yang dangkal dimana letaknya tidak jauh dari permukaan tanah dan berada diatas lapisan kedap air contohnya ada pada air sumur.

2) Air tanah Artesis (Dalam)

Air tanah yang terletak di antara lapisan akuifer dan batuan kedap air, contohnya sumur artesis. Air Artesis disebut juga dengan air tanah dalam, karena dapat ditemukan pada kedalaman 30 -80 meter dari permukaan tanah. Air tanah ini dapat diminum atau dikonsumsi secara langsung karena sudah mengalami penyaringan secara sempurna dan terbebas dari kuman ataupun bakteri.

d. Air PDAM

PDAM merupakan Perusahaan Daerah Air Minum untuk mendistribusikan air bersih kepada masyarakat. Air PDAM berasal dari

air permukaan yang mengalir dan diolah sehingga menjadi air bersih yang layak pakai.

2. Faktor yang mempengaruhi kualitas air

Menurut Mardizal et al. (2024) kualitas air tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya:

a. Aktivitas manusia

Aktivitas manusia yang menghasilkan limbah industri, limbah pertanian, limbah domestik, dan aktivitas pertambangan merupakan sumber utama pencemaran air tanah oleh zat-zat berbahaya seperti logam berat, pestisida, dan bahan kimia organik. Selain itu, praktik pengelolaan limbah yang buruk juga dapat mengakibatkan pencemaran air tanah.

b. Sifat Geologi

Karakteristik geologi dapat mempengaruhi kualitas air tanah, seperti jenis tanah, batuan, dan akuifer. Misalnya, tanah dengan tingkat infiltrasi yang rendah cenderung memiliki tingkat pencemaran air tanah yang lebih tinggi karena air tidak disaring dengan baik oleh tanah.

c. Hidrologi

Pola aliran tanah dan perubahan tata guna lahan juga dapat memengaruhi kualitas air tanah. Perubahan tata guna lahan seperti urbanisasi dapat meningkatkan aliran permukaan air yang membawa polutan ke dalam akuifer, sedangkan pola aliran air tanah yang lambat dapat memperpanjang waktu tinggal polutan di dalam akuifer

d. Perubahan iklim

Perubahan iklim global dapat mempengaruhi pola curah hujan dan suhu, yang pada gilirannya dapat memengaruhi kualitas air tanah. Curah hujan yang meningkat dapat menyebabkan peningkatan aliran permukaan yang membawa polutan ke dalam akuifer, sementara kenaikan suhu dapat mempengaruhi kelarutan zat-zat kimia dalam air.

3. Parameter Air Bersih

Parameter – parameter utama air yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas air tanah menurut Mardizal et al. (2024) diantaranya:

a. Parameter Fisika

Parameter fisika meliputi suhu, warna, dan kejernihan air. Suhu air tanah dapat memengaruhi kelarutan zat-zat kimia di dalamnya. Sementara warna dan kejernihan dapat menjadi indikator adanya zat – zat terlarut atau partikel padat.

b. Parameter Kimia

Parameter kimia meliputi pH, konsentrasi oksigen terlarut, konsentrasi logam berat, dan konsentrasi nutrisi seperti nitrogen dan fosfor. pH yang ekstrim dapat menghambat pertumbuhan organisme akuatik, sedangkan konsentrasi oksigen yang rendah dapat menyebabkan “kematian” bagi ekosistem air tanah. Logam berat seperti timbal dan merkuri dapat bersifat toksik bagi organisme, sementara konsentrasi nutrisi yang berlebihan dapat menyebabkan eutrofikasi dan pertumbuhan alga yang berlebihan.

c. Parameter Biologi

Meliputi keberadaan mikroorganisme patogen dan organisme makroinvertebrata. Keberadaan mikroorganisme patogen seperti bakteri yang berasal dari limbah domestik atau industri dapat membahayakan kesehatan manusia. Organisme makroinvertebrata seperti larva serangga dan cacing tanah dapat menjadi indikator kesehatan ekosistem air tanah.

4. Baku Mutu Air Bersih

Baku mutu air untuk keperluan higiene sanitasi berdasarkan Permenkes No 2 Tahun 2023 adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Baku Mutu Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi Menurut Permenkes No 2 Tahun 2023

No	Jenis Parameter	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Satuan
Mikrobiologi			
1.	<i>Escherichia coli</i>	0	CFU/100ml
2.	Total Coliform	0	CFU/100ml
Fisik			
3.	Suhu	Suhu udara ± 3	$^{\circ}\text{C}$
4.	Total Dissolve Solid	<300	mg/l
5.	Kekeruhan	<3	NTU
6.	Warna	10	TCU
7.	Bau	Tidak berbau	-
Kimia			
8.	pH	6,5 – 8,5	-
9.	Nitrat	20	mg/l
10.	Nitrit	3	mg/l
11.	Kromium valensi 6	0,01	mg/l
12.	Besi (Fe)	0,2	mg/l
13.	Mangan (Mn)	0,1	mg/l

Baku mutu kandungan *Escherichia coli* dalam air adalah sebanyak 0 CFU/100ml atau dengan kata lain tidak boleh ada *Escherichia coli* dalam air.

C. Desinfeksi Air Bersih

Desinfeksi adalah proses untuk memusnahkan patogen yang dapat menimbulkan penyakit. Menurut Syahputra et al. (2022) desinfeksi adalah proses untuk membunuh bakteri-bakteri patogen penyebab penyakit, mikroorganisme dan sebagai oksidator dalam air. Disinfeksi berbeda dengan sterilisasi, karena pada proses sterilisasi seluruh mikroorganisme akan mati, sedangkan pada disinfeksi ada beberapa spora bakteri yang lebih tahan terhadap disinfeksi dibanding bentuk vegetatif.

1. Metode Desinfeksi

Metode desinfeksi yang sering digunakan menurut Syahputra et al. (2022) adalah klorinasi, ozonasi, klorin dioksida, pemanasan ultraviolet, dan disinfeksi dengan pH tinggi.

a. Klorinasi

Klorinasi merupakan salah satu bentuk pengolahan air yang bertujuan untuk membunuh kuman dan mengoksidasi bahan-bahan kimia dalam air. Klorin ini banyak digunakan dalam pengolahan limbah industri, air kolam renang, dan air minum di negara-negara sedang berkembang karena sebagai desinfektan, biayanya relatif murah, mudah, dan efektif. Senyawa-senyawa klor yang umum digunakan dalam proses klorinasi, antara lain, gas klorin, senyawa hipoklorit, klor dioksida, bromin klorida, dihidroisosianurat dan kloramin (BBTKLPP Surabaya, 2021). Kemampuan desinfeksi klorin berasal dari sifat propertisnya sebagai oksidator kuat. Klorin mengoksidasi enzim yang berfungsi

sebagai proses metabolis pada mikroorganisme. Ada dua jenis reaksi yang terjadi jika klorin dibubuhkan kedalam air, yaitu hidrolisis dan ionisasi.

b. Ozonisasi

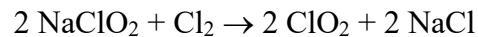
Ozon merupakan senyawa yang mampu membunuh bakteri dan mempunyai daya oksidasi yang kuat. Oksidator ini sekarang digunakan sebagai disinfektan utama untuk membunuh atau menginaktivasi mikroorganisme patogen dan untuk mengoksidasi zat besi dan mangan, senyawa penyebab rasa dan bau, warna, zat organik, deterjen, fenol serta zat organik lain. Sebagai disinfektan, ozon dapat dengan cepat membunuh virus, bakteri dan jamur serta mikroorganisme lainnya.

Desinfeksi dengan ozon memiliki beberapa kelebihan seperti tidak adanya bau yang tajam seperti desinfeksi dengan klorin, ozon juga dapat membuat air menjadi lebih segar. Ozon dapat diterapkan pada beberapa titik pada pengolahan air konvensional. Efektifitasnya sebagai disinfektan tidak bisa dikontrol oleh pH, dan tidak bereaksi dengan amonia. Namun, ditinjau dari biaya konstruksi, operasi, dan pemeliharaan desinfeksi dengan ozon lebih mahal dari pada klorinasi dan desinfeksi dengan UV.

c. Klorin Dioksida (ClO_2)

Klor dioksida tidak membentuk trihalomethan (THM), juga tidak beraksi dengan amonia untuk menjadi Kloramin. Oleh karena itu zat ini banyak digunakan sebagai disinfektan pada pengolahan air

minum. Oleh karena tidak dapat disimpan dalam keadaan tertekan dalam tanki, maka klorin dioksida harus diproduksi di tempat. Klor dioksida (ClO_2) dihasilkan dari reaksi gas klor dengan sodium klorit sesuai dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



atau dapat juga dihasilkan dari reaksi antara asam klorida (HCl) dengan sodium atau natrium klorit dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



ClO_2 tidak terhidrolisa dalam air namun berada sebagai gas terlarut.

Dalam larutan alkali, zat ini membentuk klorit dan klorat :



Pada pengolahan air, klorit paling banyak terbentuk. Untuk mengurangi pembentukan THM, ClO_2 digunakan sebagai preoksidan dan disinfektan utama kemudian diikuti dengan penambahan klor untuk menjaga residual klor.

d. Pemanasan Ultra Violet

Disinfeksi dengan ultraviolet pertama dilakukan pada permulaan abad ini, namun terabaikan karena klorinasi lebih disukai. Namun akhir-akhir ini populer kembali karena ditemukan teknologi yang lebih baik. Sistem UV menggunakan lampu merkuri tekanan rendah yang tertutup dalam tabung *quartz*. Tabung dicelupkan dalam air yang mengalir dalam tanki sehingga tersinari oleh radiasi UV dengan panjang gelombang sebesar 2537 Å yang bersifat *germmicidal*. Namun transmisi UV

dengan quartz berkurang sejalan dengan penggunaan yang terus menerus. Oleh karena itu lampu quartz harus dibersihkan secara teratur dengan cara pembersihan mekanik, kimiawi dan ultrasonik.

e. Desinfeksi dengan PH Tinggi

Desinfeksi dengan pH tinggi sudah dijalankan sejak dahulu, karena alasan murah dan memberikan kenyataan tingkat menghilangkan bakteri maupun virus cukup baik. Untuk diterapkan pada air selanjutnya harus dinetralkan yang merupakan penambahan kerja pada proses. Waktu antara 1,5 – 3,5 jam diperlukan untuk membunuh fase coli pada pH 11,2 – 11,3.

2. Faktor yang Mempengaruhi Desinfeksi

Kemampuan desinfeksi dipengaruhi beberapa faktor yaitu konsentrasi desinfektan, waktu kontak, jenis dan jumlah mikroorganisme dan temperatur. Semakin besar konsentrasi desinfektan semakin besar pula laju desinfeksinya, sedangkan jenis desinfektan akan menentukan nilai koefisien pemusnahan spesifik. Menurut Said (2008) faktor yang mempengaruhi desinfeksi adalah:

a. Jenis Desinfeksi

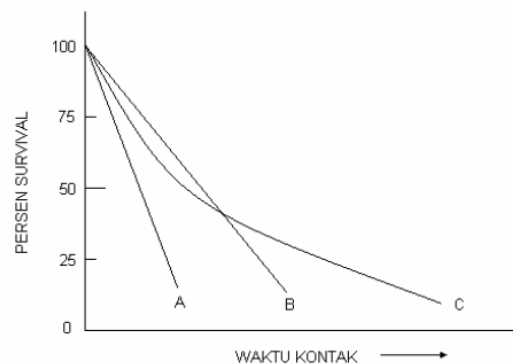
Efisiensi desinfektan tergantung pada jenis bahan kimia yang digunakan, beberapa desinfektan seperti ozon dan klorin dioksida merupakan oksidator yang kuat dibandingkan dengan yang lainnya seperti klorin.

b. Jenis Mikroorganisme

Di alam terdapat banyak sekali variasi mikroba patogen yang resisten terhadap disinfektan. Bakteri pembentuk spora umumnya lebih resisten terhadap disinfektan dibandingkan bakteri vegetatif. Terdapat juga variasi dari bakteri vegetatif yang resisten terhadap disinfektan dan juga diantara strain yang termasuk dalam spesies yang sama. Sebagai contoh *Legionella pneumophila* lebih tahan terhadap klorin dibandingkan *Escherichia coli*. Secara umum resistensi terhadap disinfeksi berurutan sebagai berikut : bakteri vegetatif < virus enteric < bakteri pembentuk spora (*spore-forming bacteria*) < kista protozoa.

c. Konsentrasi disinfektan dan waktu kontak

Inaktivasi mikroorganisme patogen oleh senyawa disinfektan bertambah sesuai dengan waktu kontak, dan idealnya mengikuti kinetika reaksi orde satu.



Gambar 2. 1 Kurva Waktu Kontak terhadap Ketahanan Mikroorganisme

Kurva A menunjukkan populasi mikroorganisme homogen yang sensitif terhadap disinfektan, Sedangkan kurva B menunjukkan populasi mikroorganisme homogen yang agak tahan terhadap disinfektan.

Efektifitas disinfektan dapat digambarkan sebagai $C.t$. C adalah konsentrasi disinfektan dan t adalah waktu yang diperlukan untuk proses inaktivasi sejumlah persentasi tertentu dari populasi pada kondisi tertentu (pH dan suhu). Hubungan antara konsentrasi disinfektan dengan waktu kontak diberikan oleh hukum Watson sebagai berikut:

$$K = C^n t$$

Dimana:

- K = Konstanta mikroorganisme tertentu yang terpapar disinfektan pada kondisi tertentu
- C = Konsentrasi disinfektan (mg/l).
- T = Waktu yang diperlukan untuk memusnahkan persentasi tertentu dari populasi (menit)
- n = Konstanta yang disebut koefisien pelarutan.

Apabila t diplot terhadap C pada kertas logaritma ganda (log-log), n adalah slope atau kemiringan dari garis lurus. Nilai n menunjukkan pentingnya konsentrasi disinfektan atau waktu kontak dalam proses inaktivasi mikroorganisme. Apabila $n < 1$, proses disinfeksi lebih dipengaruhi oleh waktu kontak dibandingkan dengan konsentrasi disinfektan. Apabila $n > 1$, jumlah disinfektan merupakan faktor dominan yang mengontrol proses disinfeksi, namun demikian nilai n umumnya mendekati 1.

d. pH

Dalam hal disinfeksi dengan senyawa klor, pH akan mengontrol jumlah HOCl (asam hipoklorit) dan OCl^- (hipoklorit) dalam larutan.

HOCl 80 kali lebih efektif dari pada OCl⁻ untuk *Escherichia coli*. Dalam proses disinfeksi dengan klor, harga Ct meningkat sejalan dengan kenaikan pH. Sebaliknya inaktivasi bakteri, virus dan kista protozoa umumnya lebih efektif pada pH tinggi. Pengaruh pH pada inaktivasi mikroba dengan kloramin tidak diketahui secara pasti karena adanya hasil yang bertentangan. Pengaruh pH pada inaktivasi patogen dengan ozon juga belum banyak diketahui secara pasti.

Klorin dapat bekerja dengan efektif sehingga desinfektan jika berada dalam air dengan pH sekitar 7. Klorinasi tidak akan efektif jika pH air lebih dari 7.2 atau kurang dari 6.8. Jika nilai pH air lebih dari 8,5, maka 90% dari asam hipoklorit itu akan mengalami ionisasi menjadi ion hipoklorit. Dengan demikian, khasiat desinfektan yang memiliki klorin menjadi lemah atau berkurang (Roslan et al., 2022)

e. Suhu

Inaktivasi patogen dan parasit meningkat sejalan dengan meningkatnya suhu.

f. Pengaruh kimia dan fisika pada disinfeksi

Beberapa senyawa kimia yang dapat mempengaruhi proses disinfeksi antara lain adalah senyawa nitrogen anorganik maupun organik, besi, mangan dan hidrogen sulfida. Senyawa organik terlarut juga menambah kebutuhan klor dan keberadaannya menyebabkan penurunan efisiensi proses disinfeksi.

Kekeruhan dalam air disebabkan adanya senyawa anorganik (misal lumpur, tanah liat, oksida besi) dan zat organik serta sel-sel mikroba. Kekeruhan diukur dengan adanya pantulan cahaya (*light scattering*) oleh partikel dalam air. Hal ini dapat mengganggu pengamatan coliform dalam air, disamping itu kekeruhan dapat menurunkan efisiensi klor maupun senyawa disinfektan yang lain. Kekeruhan (*turbidity*) harus dihilangkan karena mikroorganisme yang bergabung partikel yang ada di dalam air akan lebih resistan terhadap disinfektan dibandingkan dengan mikroorganisme yang bebas. Gabungan Total Organic Carbon (TOC) dengan kekeruhan akan menaikkan kebutuhan klor. Mikroorganisme jika bergabung dengan zat kotoran manusia, sampah dan padatan air buangan akan tahan terhadap disinfektan

Efek proteksi dari partikel di dalam air terhadap ketahanan mikroorganisme di dalam proses disinfeksi tergantung pada ukuran dan sifat alami dari partikel tersebut. Sel yang bergabung dengan poliovirus lebih tahan terhadap inaktivasi klor, sedangkan bentonit dan aluminium phospat bila bergabung dengan virus tidak memberikan efek proteksi seperti tersebut di atas. Virus dan bakteri yang bergabung dengan bentonit tidak tahan terhadap inaktivasi ozon. Virus yang bergabung dengan padatan lebih tahan terhadap klor dari pada keadaan bebas. Menurunkan kekeruhan ke tingkat lebih kecil dari 0,1 NTU dapat

menjadi ukuran untuk menghindari efek proteksi dari partikel pada saat proses disinfeksi.

g. Faktor lain

Patogen dan indikator bakteri yang ditumbuhkan di laboratorium lebih sensitif terhadap disinfektan dari pada yang berada di alam (Said, 2008). *Flavobacterium* yang berada di alam 200 kali lebih tahan terhadap klor daripada yang dibiakkan di laboratorium. *Klebsiella pneumoniae* lebih tahan terhadap kloramin apabila tumbuh pada kondisi nutrient rendah. Penambahan ketahanan terhadap kloramin disebabkan oleh beberapa faktor faal (*physiological factors*), misal penambahan pengelompokan sel dan produksi *extracellular polymer*, perubahan membran lipid, dan pengurangan oksidasi kelompok *sulphydryl*. Kekebalan yang terjadi pada strain bakteri alami karena keterbatasan makanan dan zat perusak seperti disinfektan, mungkin pula disebabkan oleh sintesis dari protein tertekan, namun prosesnya tidak dapat dimengerti. Fenomenanya masih menjadi tanda tanya karena tidak bergunanya data desinfeksi di laboratorium untuk mengamati inaktivasi patogen pada keadaan di lapangan. Paparan pertama dapat menambah ketahanan mikroba terhadap disinfektan. Paparan pengulangan mikroorganisme pada klor menghasilkan adanya bakteri dan virus tertentu yang tahan terhadap disinfektan. Penggabungan mikroorganisme patogen umumnya mengurangi efisiensi disinfektan.

D. Klorinasi

Klorinasi adalah proses pengolahan air minum dengan menambahkan klorin ke dalam air sehingga air terhindar dari mikroorganisme patogen. Klorinasi merupakan salah satu bentuk pengolahan air yang bertujuan untuk membunuh kuman dan mengoksidasi bahan-bahan kimia dalam air ((Roslan et al., 2022)). Dua faktor terpenting yang menentukan efektivitas disinfeksi dengan klorin adalah konsentrasi klorin dan waktu kontak klorin. pH air, kekeruhan air, paparan sinar matahari serta suhu air juga memainkan peran penting. (Tamjidillah & Ramadhan, 2023).

1. Jenis – Jenis Klorin

Jenis klorin menurut Ali (2010) diantaranya klorin cair (*liquid Klorin*), senyawa hipoklorit, *Klorid of lime* (CaOCl_2) dan klorin dioksida (ClO_2).

a. Klorin Cair (*Liquid Klorin*)

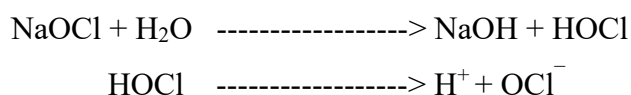
Klorin cair adalah gas klor yang dikondisikan pada tekanan dan temperatur tertentu sehingga berbentuk cair. Besar tekanan yang dibutuhkan kurang lebih 2,66 atmosfer pada tekanan 0°C , sedangkan pada temperatur 100°C tekanan yang dibutuhkan sebesar 41 atmosfer. Untuk menjaga tekanan yang besar tersebut, cairan klorin disimpan dalam tabung yang terbuat dari baja. Pada kondisi udara luar cairan klor ini berbentuk gas sehingga untuk pelaksanaan injeksi tabung penampung tersebut cukup dihubungkan dengan pipa dan dilakukan pengaturan debit dan tekanannya.

b. Senyawa Hipoklorit

Hipoklorit merupakan bentuk senyawa klor dengan potensial oksidasi yang tinggi yang hampir sama dengan potensial oksidasi gas klor. Hipoklorit dapat dihasilkan dari hidrolisa garam – garam klorida dimana penyebarannya tergantung dari pH dan temperatur air.

1) Sodium Hipoklorit (NaOCl)

Sodium hipoklorit (NaOCl) berbentuk garam dengan kandungan klor tersedia sebesar 5 – 15 %. Pemilihan kekuatan larutan dan lokasi tempat penyimpanan dapat dipengaruhi oleh sifat membeku, dimana titik beku minimum kira – kira -20°F terjadi untuk konsentrasi 18 %. Pembekuan terjadi kira – kira pada 10°F dan 22°F berturut – turut dalam dan 5 % larutan. Kandungan ini akan mengalami degradasi selama penyimpanan sehingga pengontrolan larutan harus dilakukan. Sodium hipoklorit (NaOCl) tidak ekonomis bila dibandingkan dengan gas klor, karena dengan kadar klor tersedia yang rendah maka bahan yang dibutuhkan dalam pembubuhan akan jauh lebih banyak. Sodium hipoklorit mempunyai tingkat korosifitas yang tinggi, tidak stabil, membutuhkan tempat penyimpanan dengan temperatur di bawah 85°C dan pada kondisi asam dapat melepaskan gas klor ke udara. Senyawa ini banyak digunakan untuk instalasi kecil. Dalam air sodium Hipoklorit akan terhidrolisa menurut reaksi sebagai berikut:



Dengan naiknya nilai pH keberadaan HOCl akan menurun sedang konsentrasi OCl^- semakin meningkat.

2) Kalsium Hipoklorit

Kalsium hipoklorit $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ umum disebut pula kaporit yang merupakan padatan bubuk berwarna putih non higroskopik, korosif, menimbulkan bau klor dan mengandung klor tersedia sebesar 60 – 70 %. Senyawa ini lebih sering dipergunakan dari pada CaOCl_2 (Kloride of lime), karena sifatnya yang lebih stabil dan lebih melarut dalam air. Untuk menjaga kestabilan dalam air sering ditambahkan soda abu (Na_2CO_3) yang akan membentuk NaOCl dan CaCO_3 sebagai endapan. Cara pemakaiannya secara umum adalah dengan dilarutkan dalam tangki pelarut secara batch didekat titik aplikasi kemudian cairannya dialirkan ke titik aplikasi. Sedangkan endapan yang dihasilkan ditahan dalam tangki. Bahan yang dibutuhkan dengan menggunakan senyawa ini lebih banyak dibandingkan dengan menggunakan gas klor.

Setelah terjadi wabah kolera di Hamburg, orang barat mulai mendesinfeksi air minum dan desinfektan yang dipakai adalah kalsium hipoklorit. Jadi kaporit adalah desinfektan yang tertua. Di Indonesia untuk mendesinfeksi air minum banyak digunakan kaporit sebagai desinfektan, terutama oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM). Perusahaan garam dan soda negara (PGSN) sudah dapat memproduksi kaporit dan produksinya pun sudah dapat memenuhi

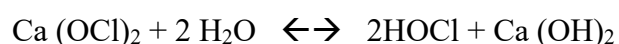
kebutuhan nasional sehingga kita tidak perlu mengimport kaporit lagi. Dengan demikian harga menjadi semakin murah. Rumus kimia dari kaporit adalah $\text{Ca}(\text{OCl})_2$.

Menurut Roslan et al. (2022) tablet/serbuk klorin merupakan pilihan utama karena harganya murah, kerjanya cepat, efisien, dan mudah digunakan. Tablet/serbuk klorin harus digunakan secara hati-hati selain beracun juga dapat menimbulkan iritasi pada kulit. Namun demikian dalam kadar tertentu aman untuk digunakan selain sifatnya mudah menguap.

c. *Kloride Of Lime* (CaOCl_2)

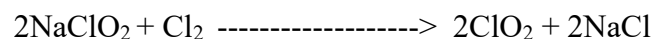
Kapur klorida (*Kloride of lime*) disebut juga kelantang berbentuk padat dengan kandungan klor tersedia sebesar 25 – 37 %. Senyawa ini tidak stabil dan mudah terdegradasi sehingga harus disimpan dalam drum dan ditempatkan pada udara dingin dan kering. Kapur klorida mengandung kapur yang tidak larut dalam air dan mengandung *suspended solid* yang menyebabkan kekeruhan. Dalam penerapan harus dilarutkan dahulu pada tangki penjenuh, sehingga kapur yang ada diendapkan dan larutan klor dipisahkan untuk diinjeksikan. Kaporit akan bereaksi sama seperti Cl_2 yang

dilarutkan dalam air, yaitu seperti reaksi di bawah ini :



d. Klorin Dioksida (ClO_2)

Klorin dioksida jarang digunakan untuk desinfeksi. Klor dioksida berupa gas berwarna hijau kekuningan pada suhu kamar. Senyawa ini cepat terdegradasi oleh sinar ultraviolet dan sensitive terhadap temperatur dan tekanan, serta mudah meledak. Senyawa ini mempunyai potensial oksidasi yang hampir sama dengan asam Hipoklorit. Oleh karena itu senyawa ini disiapkan pada tempat dan waktu yang digunakan (*on site*), sehingga membutuhkan pembangkit dalam penggunaannya. Klor dioksida bisa dihasilkan dari campuran gas klor dengan sodium hipoklorit. Klorin dioksida dalam air tidak stabil dan mudah mengalami perubahan bentuk dan potensial oksidasi pada perubahan pH atau oleh kehadiran amonia. Klorin dioksida dalam air dapat dikontrol dengan memberikan sodium klorin oksida menurut reaksi sebagai berikut:



Untuk waktu kontak yang pendek ClO_2 lebih menarik untuk digunakan. Apabila karakteristik air banyak mengandung senyawa pengotor penggunaan materi ini menjadi tidak efektif.

2. Cara Kerja Klorinasi

Cara kerja klorin dalam membunuh kuman yaitu dengan merusak struktur sel organisme, sehingga kuman akan mati. Jika air mengandung lumpur, bakteri dapat bersembunyi di dalamnya dan tidak dapat dicapai oleh klorin. Klorin membutuhkan waktu untuk membunuh semua organisme.

Pada air yang bersuhu lebih tinggi atau sekitar 18°C, klorin harus berada dalam air paling tidak selama 30 menit. Jika air lebih dingin, waktu kontak harus ditingkatkan. Klorin ditambahkan ke air segera setelah air dimasukkan ke dalam tangki penyimpanan atau pipa penyalur agar zat kimia tersebut mempunyai cukup waktu untuk bereaksi dengan air sebelum mencapai konsumen.

Klorin menyebabkan dua jenis kerusakan pada sel bakteri. Jenis kerusakan tersebut adalah (Said, 2008) :

- a. Perusakan kemampuan permeabilitas sel (*disruption of cell permeability*).

Klor bebas dapat merusak membran sel bakteri, sehingga kehilangan kemampuan permeabilitasnya (kemampuan menembus) dan mengalami gangguan fungsi sel lainnya. Paparan klor mengakibatkan kebocoran protein, RNA dan DNA dari dalam sel. Kematian sel terjadi akibat pelepasan *Total Organic Carbon* (TOC) dan senyawa yang menyerap sinar UV, penurunan penyerapan kalium, serta berkurangnya sintesis protein dan DNA. Kerusakan pada kemampuan permeabilitas juga menjadi penyebab hancurnya spora bakteri oleh klor.

- b. Perusakan asam nukelat dan enzim (*Damage to nucleic acids and enzymes*)

Klorin juga merusak asam nukleat serta enzim pada bakteri. Penurunan aktivitas katalis disebabkan oleh hidrogen peroksida. Mekanisme kerja klor terhadap virus bergantung pada jenis virusnya.

Pada bakterioophage dan poliovirus tipe 1, kerusakan asam nukleat merupakan mekanisme utama inaktivasi, sedangkan pada jenis virus lain, pelapis protein merupakan sasaran utama.

3. Prinsip-Prinsip Pemberian Klorin

Menurut Roslan et al. (2022) terdapat beberapa prinsip yang perlu diperhatikan ketika melakukan proses klorinasi, antara lain:

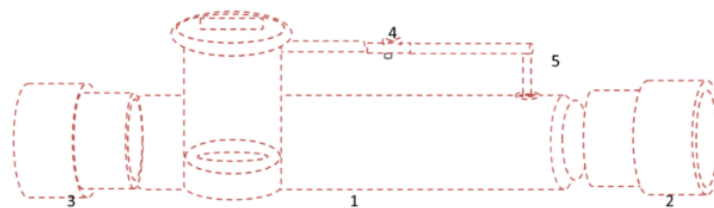
- a. Air harus jernih dan tidak keruh karena kekeruhan pada air akan menghambat proses klorinasi.
- b. Kebutuhan klorin harus diperhitungkan secara cermat agar dapat dengan efektif mengoksidasi bahan-bahan organik dan dapat membunuh kuman patogen dan meninggalkan sisa klorin bebas dalam air.
- c. Tujuan klorinasi pada air adalah untuk mempertahankan sisa klorin bebas sebesar 0,2 mg/l didalam air. Nilai tersebut merupakan *margin of safety* (nilai batas keamanan) pada air untuk membunuh kuman patogen yang mengkontaminasi pada saat penyimpanan dan pendistribusian air.
- d. Dosis klorin yang tepat adalah jumlah klorin dalam air yang dapat dipakai untuk membunuh kuman patogen serta untuk mengoksidasi bahan organik dan untuk meninggalkan sisa klorin bebas sebesar 0,2 mg/l dalam air

4. Bahaya Klorin terhadap Manusia

Klorin merupakan senyawa oksidator kuat yang berbahaya jika masuk kedalam tubuh manusia. Klorin berpotensi menyebabkan iritasi mata, kulit dan iritasi saluran pernafasan atas (Hayat, 2020)

E. Tabung Klorinator

Tabung klorinator merupakan alat sederhana yang berfungsi untuk mengalirkan disinfektan seperti klorin (Cl) yang berfungsi untuk mengurangi kontaminan berupa mikroorganisme patogen di dalam air (Habibi et al., 2019). Tabung klorinator dapat berupa tabung dengan ball valve ataupun tanpa ball valve. Penggunaan ball valve pada tabung klorinator adalah untuk mengatur banyaknya air yang mengenai klorin. Salah satu desain tabung klorinator dengan *ball valve* yang dibuat oleh BBTKLPP Surabaya (2021) adalah sebagai berikut:

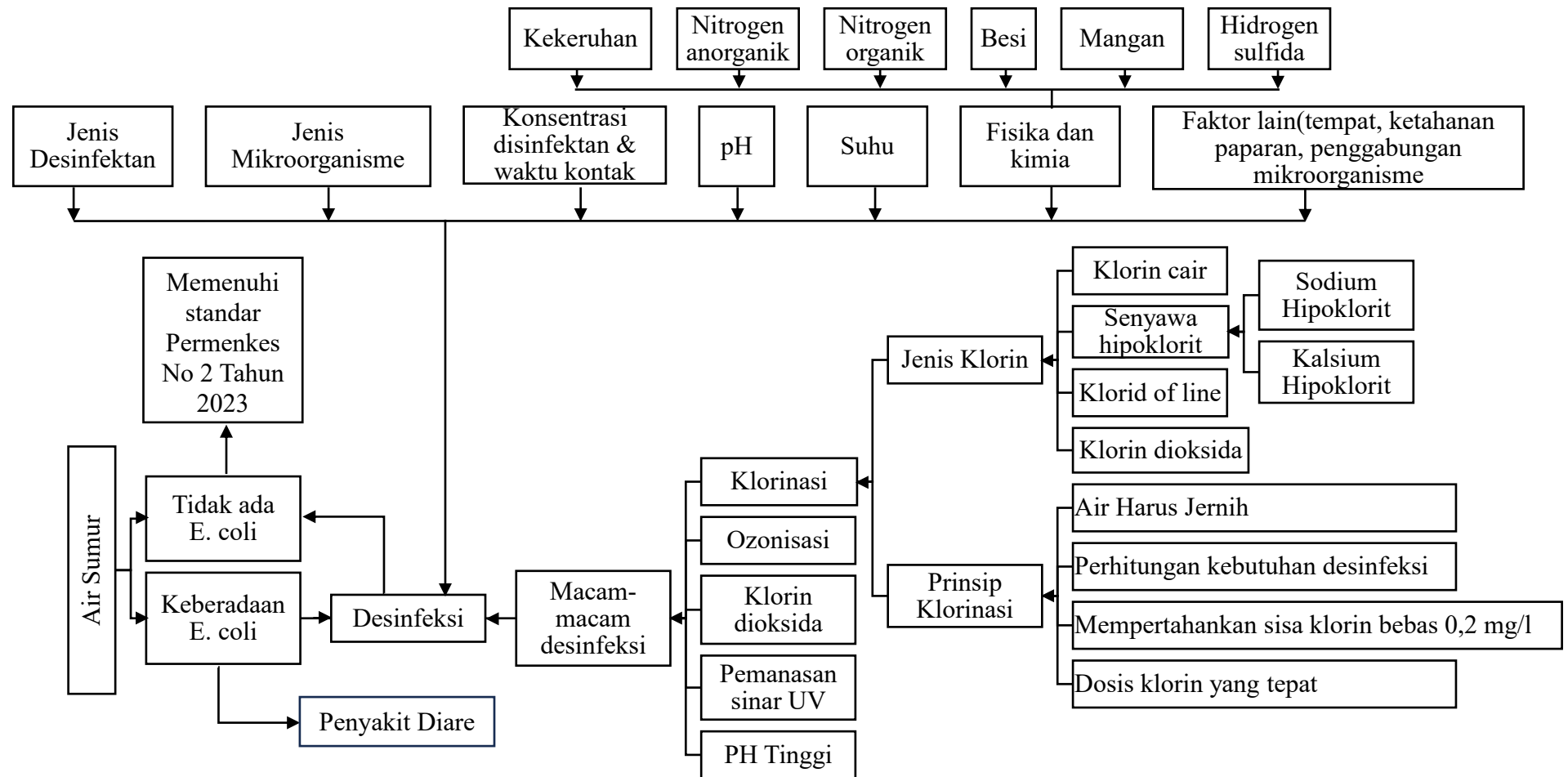


Gambar 2. 2 Desain Tabung Klorinator

Keterangan:

1. Tabung untuk tempat mengisi tablet Klorin
2. Tabung bodi
3. Shock PVC untuk penyambung pipa
4. Stop kran sebagai pengatur keluarnya larutan Klorin
5. Pipa penghubung dari tabung chlor ke pipa pipa distribusi

F. Kerangka Teori



Gambar 2. 3 Kerangka Teori Modifikasi dari Said (2008) , Ali (2010), Syahputra et al. (2022) & Ruslan et.al. (2022)